

AALTO-YLIOPISTO
INSINÖÖRITIEIDEN KORKEAKOULU
KONEENRAKENNUSTEKNIKAN LAITOS

Jani Renvall

Lisäävien menetelmien soveltuvuus prosessiteollisuuteen, soveltamiskohteena mekaaninen tiiviste

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vantaa, 7.11.2014

Työn valvoja: Professori Jouni Partanen

Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Erik Törnqvist

Tekijä Jani Renvall

Työn nimi Lisäävien menetelmien soveltuvuus prosessiteollisuuteen,
soveltamiskohteena mekaaninen tiiviste

Laitos Koneenrakennustekniikan laitos

Pääaine Tuotantotekniikka

Professuurikoodi Kon-15

Työn valvoja Professori Jouni Partanen

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Erik Törnqvist

Päivämäärä 7.11.2014

Sivumäärä 78

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tämän diplomityön tavoitteena on selvittää lisäävien menetelmien soveltuvuus prosessiteollisuuden näkökulmasta ja tarkastelu tehdään mekaanisen liukurengastiivisteiden metallisille rakenneosille. Tutkimuskysymys voidaan kiteyttää seuraavasti: ”Voiko lisäävillä menetelmillä tehdä mekaanisen tiivisteiden?”

Tutkimuksen teoreettinen aineisto koostuu alan kirjallisuudesta sekä yksityisten tahojen julkaisemista internetmateriaaleista. Tietoa kerätään myös laitevalmistaja- sekä konepajahaastatteluin. Kerätyn tiedon ja yhteistoiminnan pohjalta toteutetaan valitulla menetelmällä liukurengastiiviste, jonka onnistumista verrataan vakiotuotteeseen. Vertailua tehdään korroosion, valmistettavuuden sekä toiminnallisuuden suhteen. Valmistetulle tuotteelle tehdään lisäksi tuotantokustannusarviointi tutkimusta varten luodun analyysin avulla.

Lisäävistä teknologioista pulveripetisulatusmenetelmä havaittiin toimivimmaksi vaihtoehdoksi ja tiiviste toteutettiin laserkoneistamalla. Korroosiokokeissa pulverimateriaalien todettiin vastaavan kaupallisen nimikkeen arvoja ja lastuavalla työstöllä viimeistellyn tuotteen ominaisuudet todettiin vastaavan vakiotuotetta. Tuotantokustannuksiltaan kyseinen menetelmä todettiin vertailukelpoiseksi vakiotuotteen kustannuksille.

Tutkitun tiedon perusteella on todettavissa, että lisäävillä menetelmillä on mahdollista tehdä toimiva mekaaninen liukurengastiiviste. Lisäksi kustannuslaskelmien tulokset antavat rohkaisevan viittauksen sille, että lisäävien menetelmien ottamista tiivisteiden tuotantoon kannattaa tutkia lisää.

Avainsanat Ahdistussovite, AM, DFM, DFMA, DLMS, EBM, elektronikoneistus, korroosio, kustannuslaskelmat, laserkoneistus, lastuava työstö, lipeä, lisäävä koneistus, lisäävä valmistus, lisäävät menetelmät, liukurengastiiviste, mekaaninen tiiviste, nikkeliseos, optimointi, prosessiteollisuus, RENI, rikkihappo, ruostumaton teräs, titaani, tuotanto, viimeistelykoneistus

Author Jani Renvall

Title of thesis Performance of Additive Manufacturing in the Process Industry, Mechanical Seals as a Target of Application

Department Department of Engineering Design and Production

Major Production Engineering

Code of professorship Kon-15

Thesis supervisor Professor Jouni Partanen

Thesis advisor Erik Törnqvist, M.Sc. (Tech.)

Date 7.11.2014

Number of pages 78 **Language** Finnish

Abstract

The purpose of this master thesis is to study the performance of additive manufacturing (AM) for the process industry. The study focuses on the metallic structural parts of mechanical seal. The main research question can be simplified to "Is it possible to make mechanical seal using additive manufacturing methods?"

The theoretical data of the study is collected from both professional literature and internet material published by private enterprises. Additional information is collected by interviewing machine manufacturers and engineering workshops. One of the studied manufacturing methods is chosen to produce a mechanical seal, according to gathered knowledge and with help of cooperation. The performance of the chosen method is evaluated by comparing the produced seal to a standard seal through corrosion, manufacturing and operational tests. The production costs of the produced seal are also estimated by a novel analysis method created for this thesis.

The powder bed fusion (PBF) was recognized as the most useful method of AM technology and the mechanical seal was manufactured by laser sintering. In corrosion tests the tested powder metals were verified to be similar to the conventional trade names of the materials. The manufactured seal was finished by chipping and its properties were verified to be equal to standard product. The production costs were determined to be comparable to standard product costs.

According to information obtained in the course of this thesis, it is verified that it is possible to make functional mechanical seal by additive manufacturing technology. Production cost analysis encourages keeping on researching AM production for mechanical seals.

Keywords Additive Machining, Additive Manufacturing, AM, Corrosion, Cost analysis, DFM, DFMA, DLMS, EBM, Electron Machining, Nickel Alloy, Face Ring Seal, Finishing Machining, Interference fit, Laser Machining, Lye, Machining, Mechanical Seal, Optimisation, Production, Process Industry, RENI, Stainless Steel, Sulfuric-acid, Titanium

ALKUSANAT

Tässä opinnäytetyössäni pyrin käyttämään mahdollisimman kattavasti koko tietotaitoani, jota olen kartuttanut opiskelu-urallani Teknillisessä Korkeakoulussa, Aalto-yliopistossa sekä University of Limerickissä. Opimisen aikana myös paljon uutta, kuten konetekniikan opinnoista poikkeavan korroosiotestin teon. Lisäävään valmistukseen olen tutustunut opintojeni puolivälissä ja olen perehtynyt aihepiiriin kesätöiden ohessa sekä ennen kaikkea Aalto-yliopiston FDM/FFF-koneilla tekemiäni omien kokeilujen kautta. Kiitos näistä kokeilumahdollisuuksista kuuluu Aalto Digital Design laboratoriolle ja erityisesti tuotantotekniikan laboratorion henkilökunnalle.

Haluaisin kiittää työni ohjaajaa Erik Törnqvistiä, jonka näkemys uuden teknologian tutkimiseen mahdollisti tämän diplomityön tekemisen. Kiitän myös koko Tiivistetekniikan ja Tiivistekeskuksen henkilökuntaa saamastani tuesta. Heidän pyyteettömän auttamisen, neuvonnan ja opastuksen avulla ymmärrän nyt paljon enemmän tiivisteiden teknologiaa, joka on paljon enemmän mitä alkuun luulin. Lisäksi kiitos kuuluu Electro Optical Systems Finland Oy:lle, jonka avulla tutkimuksen kokeellinen osio pystyttiin suorittamaan.

Tämä työ viimeistelee jo lapsuudestani asti muodostuneen päämäärän tulla ”isona” insinööriksi. Kantani ei ole tästä horjunut ja olen nyt valmis kantamaan vastuuni ammattikuntani edustajana. Haluankin kiittää perhettäni, ystäviäni, opiskelukavereitani, opettajiani ja ennen kaikkea avopuolisoani Sariannaa tämän tavoitteen saavuttamisesta.

Vantaalla 7.11.2014

Jani Renvall

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Lyhenteet

Merkinnät

1	Johdanto.....	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen teetättävä yritys.....	1
2	Tavoitteet ja rajaust.....	2
2.1	Tutkimustavoite.....	2
2.2	Tutkimuksen rajaust	2
3	Liukurengastiivisteent teknologia	3
3.1	Materiaalit	6
3.2	Mekaniikka	7
3.3	Valmistus	10
4	Lisäävien menetelmien teknologia	14
4.1	Materiaalia lisäävä valmistus	14
4.1.1	Lisäävien menetelmien jaottelu	15
4.1.2	Suunnitelmasta tuotteeksi.....	17
4.1.3	Käyttöfilosofiat.....	18
4.2	Metalliset pulveripetisulatusmenetelmät.....	20
4.2.1	Pulverimetallit.....	22
4.2.2	Tekniikka	24
4.2.3	Vaatimukset kappaleen suunnittelulle	27
4.3	Pulveripetisulatusmenetelmän tuotantokustannukset	30
4.3.1	Materiaalikustannukset	31
4.3.2	Laitekustannukset.....	33
4.3.3	Ajankäyttövertailu	36
4.3.4	Kokonaiskustannusvertailu	43

5	Liukurengastiivisteiden toteutus lisäävällä menetelmällä.....	50
5.1	Menettely	50
5.1.1	Tuote	51
5.1.2	Yhteistyökumppanin valinta	52
5.2	Materiaalien korroosiotestaus	53
5.3	Osien toteutus	57
5.3.1	Suunnittelu.....	57
5.3.2	Valmistus.....	60
5.4	Mekaaninen testaus	66
5.5	Kustannus- ja aika-arviot	72
6	Yhteenveto	77
7	Pohdinta	78
8	Lähdeluettelo	79

LYHENTEET

AM	Additive Manufacturing	Lisäävä valmistus
ASTM	American Society for Testing and Materials	Yhdysvaltalainen standardointiliitto
CAM	Computer Aided Manufacturing	Tietokoneavusteinen valmistus
CNC	Computerized Numerical Control	Tietokoneohjattu numeerinen ohjaus
DED	Direct Energy Deposition	Hitsausmenetelmä (AM)
DFAM	Design For Additive Manufacturing	Tuotteen suunnittelu lisääviä menetelmiä varten
DFMA	Design For Manufacturing and Assembly	Tuotteen suunnittelu valmistusta varten
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Suorametallilasersintraus (AM)
DTM	Desk Top Manufacturing	AM-yritys 80- ja 90-luvulla.
FDM	Fused Deposition Modeling	Markkinanimi pursottavalle menetelmälle
LOM	Laminated Object Manufacturing	Laminointimenetelmä (AM)
LP	Liukupoksi	Tiivistetekniikka Oy:n tuote
LS	Laser Sintering	Lasersintraus (AM)
PBF	Powder Bed Fusion	Pulveripetisulatusmenetelmä (AM)
PREN	Pitting Resistance Equivalent Number	Kolosyöpymistä vastaava lukuarvo
PSW	Process Software	CAM-ohjelma lasersintraukselle
RENI	Referencing Evaluation by Numerical Inspection	Valmistusmenetelmän laskennallinen arviointitapa
RP	Rapid Prototyping	Pikamallin valmistus
RT	Rapid Tooling	Työkalun pikavalmistus
SLM	Selective Laser Melting	Valikoiva lasersulatus (AM)
SLS	Selective Laser Sintering	Valikoiva lasersintraus (AM)
STL	Stereolithography (file format)	3D-tiedostomuoto

MERKINNÄT

A	Asetusajanlisäys muodostumisyksikköön [min/cm ³]
A _h	Tehollinen hydraulinen pinta-ala [mm ²]
A _l	Liukukosketuksen pinta-ala [mm ²]
a	Poistettavan materiaalin määrä suhteessa aihioon
a _c	Tuotekustannuksien leikkauskohdat poistettavan materiaalmäärän suhteen
a _{C,kok}	Kokonaiskustannuksien leikkauskohdat poistettavan materiaalmäärän suhteen
a _G	Koneistusaikojen leikkauskohdat poistettavan materiaalin suhteen
a _{G,kok}	Kokonaisaikojen leikkauskohdat poistettavan materiaalin suhteen
a _{mat}	Materiaalihintojen leikkauskohta poistettavan materiaalmäärän suhteen
a _p	Lastuamissyvyys [mm]
b ₁	Regressiokulmakerroin pumpun rungon lämpötilalle laserkoneistetussa tiivisteessä
b ₂	Regressiokulmakerroin pumpun rungon lämpötilalle vakiotiivisteessä
C _{asetus}	Tuotteen asetuskustannukset [€/kg]
C _{kok}	Tuotteen kokonaiskustannus [€/kg]
C _{kone}	Tuotteen koneistuskustannukset [€/kg]
C _{mat}	Tuotteen materiaalikustannukset [€/kg]
C _{mat,lastu}	Tuotteen materiaalikustannukset lastuavalla koneistuksella [€/kg]
C _{mat,PBF}	Tuotteen materiaalikustannukset PBF-koneistuksella [€/kg]
C _{tuote}	Tuotteen kustannus [€/kg]
D _s	Liukupinnan sisähalkaisija [mm]
d	Akselihalkaisija [mm]
d _u	Liukupinnan ulkohalkaisija [mm]
f _n	Kierrossyöttö [mm/kierr.]
G	Tuotteen ominaismuodostumisaika [min/cm ³]
G _{kok}	Kokonaisominaismuodostumisaika [min/cm ³]
G _{lastu}	Tuotteen ominaismuodostumisaika lastuavalla koneistuksella [min/cm ³]
G _{PBF}	Tuotteen ominaismuodostumisaika PBF-koneistuksella [min/cm ³]
h _{kerros}	Käytettävä kerrospaksuus [mm]
h _{kok}	Valmistettava kokonaiskorkeus, sisältää myös tukirakenteen [mm]
k	Hydraulinen tasapainosuhte
P _{aihio}	Aihion hinta [€/kg]
P _{ajo}	Koneistuksen hinta [€/min]
P _{asetus}	Asetusajan hinta [€/min]

P_{pulveri}	Pulverin hinta [€/kg]
P_{tuki}	Pulverihinta tukimateriaalille [€/kg]
P_{tuote}	Tuotteen hinta [€]
Q_{lastu}	Lastuvirta [cm^3/min]
Q_{sula}	Pulverin sulamisnopeus [cm^3/min]
S_{b1}	Laserkoneistetun tiivisteen kulmakertoimen otoskeskihajonta
S_{b2}	Vakiotiivisteen kulmakertoimen otoskeskihajonta
t	Student t-testin vertailuun käytettävä laskennallinen arvo
t_{asetus}	Asetusaika [min]
t_{kok}	Tuotteen valmistusaika [h]
t_{lana}	Kerroksen lanaamiseen kuluva aika [min]
t_{lastu}	Tuotteen valmistusaika lastuavassa koneistuksella [min]
t_{PBF}	Tuotteen valmistusaika PBF-koneistuksessa [min]
V_{aihio}	Aihion tilavuus [cm^3]
V_{kok}	Valmistettava kokonaistilavuus sisältäen tukirakenteen [cm^3]
V_{tuote}	Tuotteen tilavuus [cm^3]
w_{Cr}	Kromin massaprosentti määrä seoksessa [%]
w_{Mo}	Molybdeenin massaprosentti määrä seoksessa [%]
w_{N}	Typen massaprosentti määrä seoksessa [%]
w_{W}	Volframin massaprosentti määrä seoksessa [%]
v_c	Lastuamisnopeus [m/min]
ρ_{mat}	Käytettävän materiaalin tiheys [kg/cm^3]

1 JOHDANTO

1.1 TUTKIMUKSEN TAUSTA

Materiaalia lisäävä valmistus (*Additive Manufacturing, AM*) on kehittynyt nopeasti teknologian syntymisestä asti 1980-luvulta lähtien. Teknologian koneet ja materiaalit ovat tällä hetkellä jo vakiinnuttaneet asemansa tuotekehityksen työkaluina protokappaleiden teossa (*Rapid Prototyping, RP*). AM-menetelmät ovat myös todistaneet käytännöllisyytensä työkalujen, kuten ruiskuvalumuottien valmistuksessa (*Rapid Tooling, RT*) sekä lääketieteessä luuimplanttien teossa. Teknologia on tullut yleisesti ihmisten tietoisuuteen 2010-luvun taitteessa, kun menetelmien hinnat sekä liiketoimintamallit olivat kehittyneet lähemmäksi kuluttajia (*3D-printtaus*). Lisäävien menetelmien kehitys on jatkunut koko ajan ja uusien käyttökohteiden etsiminen käy tällä hetkellä vilkkaana.

Tämän diplomityön teetättäjä Tiivistetekniikka Oy:n liiketoiminta perustuu asiakasräätelöityihin tuotteisiin ja joustavaan asiakaspalveluun. Laaja tuotekirjo aiheuttaa kuitenkin haasteita tuotannon ja varastohallinnon suhteen, joten lisäävien menetelmien tarjoama joustava tuotanto on herättänyt mielenkiintoa Tiivistetekniikassa.

1.2 TUTKIMUKSEN TEETÄTTÄVÄ YRITYS

Tiivistetekniikka Oy myy, valmistaa ja huoltaa mekaanisia tiivisteitä, joita käytetään erityisesti prosessiteollisuudessa. Liiketoiminta on aloitettu vuonna 1963 ja itse yritys perustettu 1979 kuuluen osana Etola-konserniin. Päätoimipiste sijaistaa Vantaalla ja omaa myyntiedustusta on Turussa, Jyväskylässä ja Oulussa. Omien ”LP-liukurengastiiviste” -tuotteittensa lisäksi Tiivistetekniikka edustaa myös saksalaisen EagleBurgmann GmbH:n tuotteita. Päämarkkina-alue on Suomi, mutta yrityksen omia tuotteita myydään myös EagleBurgmannin kautta ympäri maailmaa. Tiivistetekniikan liikevaihto vuonna 2013 oli 11,8 M€ ja yritys työllistää 17 henkilöä.

2 TAVOITTEET JA RAJAUS

2.1 TUTKIMUSTAVOITE

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää materiaalia lisäävien menetelmien tarjoamat mahdollisuudet Tiivistetekniikka Oy:n kannalta. Pohjimmiltaan tutkimuksen on vastattava kysymykseen: ”Voiko lisäävillä menetelmillä tehdä toimivan mekaanisen tiivisteen?”

Tutkimuksen on selvitettävä mekaanisien tiivisteiden valmistukseen soveltuvia lisääviä menetelmiä sekä niiden materiaalitarjontaa prosessiteollisuuden kannalta. Korroosionkestoa, valmistettavuutta ja mekaanista kestoja halutaan testata fyysisillä kappaleilla. Kappaleet tehdään menetelmällä, joka koetaan tutkimuksen kannalta parhaimmaksi valinnaksi. Koska kyseessä on valmistavaa tuotantoa, tutkimus ottaa myös kantaa lisäävien menetelmien kustannuksiin sekä tuotannon läpäisy aikaan. Tutkitun tiedon perusteella pyritään myös arvioimaan aihepiirin tulevaisuuden näkymiä.

2.2 TUTKIMUKSEN RAJAUS

Tutkimus rajataan koskemaan yrityksen omaa tuotetta nimeltä ”LP-liukurengastiiviste” ja tarkastelu tehdään sen yksitoimiselle variaatiolle. Kyseinen tiiviste koostuu 15 kokoonpantavasta osasta, joista 6 osaa on tehty metalleista sorvaamalla ja jyrsimällä. Nämä kuusi osaa ovat asiakastoimituksien kannalta kriittisimmät varioituvien mittojen ja materiaalien takia, joten AM-menetelmien suurin potentiaali nähdään näissä osissa. Koska metallit on koettu parhaimmiksi materiaaleiksi tälle tiivistetyypille, rajataan tämä diplomityö vain metallin käsittelyyn kykeneviin AM-menetelmiin.

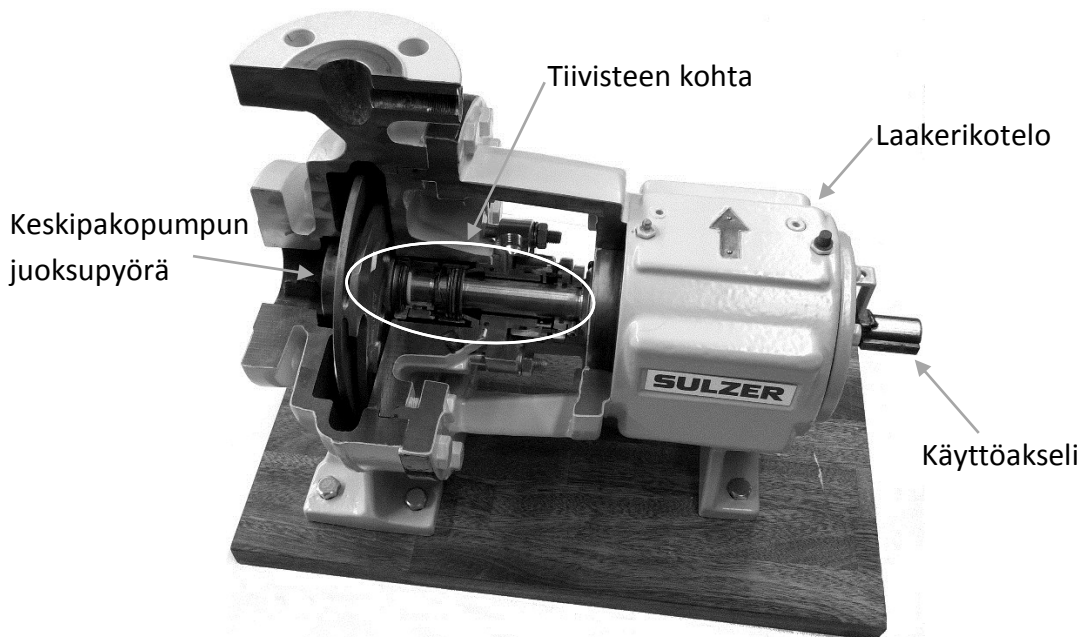
3 LIUKURENGASTIIVISTEEN TEKNOLOGIA

Tiivisteet luokitellaan staattisten ja kineettisten tiivisteen ryhmiin. Kineettiset tiivisteet ovat nimensä mukaisesti suunniteltu sovelluksiin, joissa tiivistettävä pinnat liikkuvat toisiinsa suhteen. Kineettiset tiivisteet itsessään eritellään vielä karkeasti välyksellisiin ja välyksettömiin tiivistimiin. [1]

Välyksettömiä tiivisteitä ovat muun muassa labyrinttitiiviste ja hydrostaattinen tiiviste. Labyrinttitiivisteessä eristettävä aine pakotetaan kulkemaan sokkeloisen geometrian läpi, jolloin varsinainen vuoto määräytyy välyksen koon ja sen aiheuttaman kuristuman perusteella [1]. Hydrostaattinen tiiviste toimii hydrostaattisen laakerin tavoin eli vällys syntyy liukupintojen välisestä paineesta [2].

Välyksettömät eli koskettavat tiivisteet jaotellaan tiivistysvoiman muodostumistavan perusteella. Voimia voidaan luoda joko ulkoisesti nestepaineen ja jousien tai tiivisteiden kokoonpuristumisen avulla. Mekaanisissa liukurengastiivisteissä käytetään ulkoista voimaa, kun taas kokoon puristumista hyödynnytetään säteis-, O-rengas, ja nauhatiivisteissä. [2]

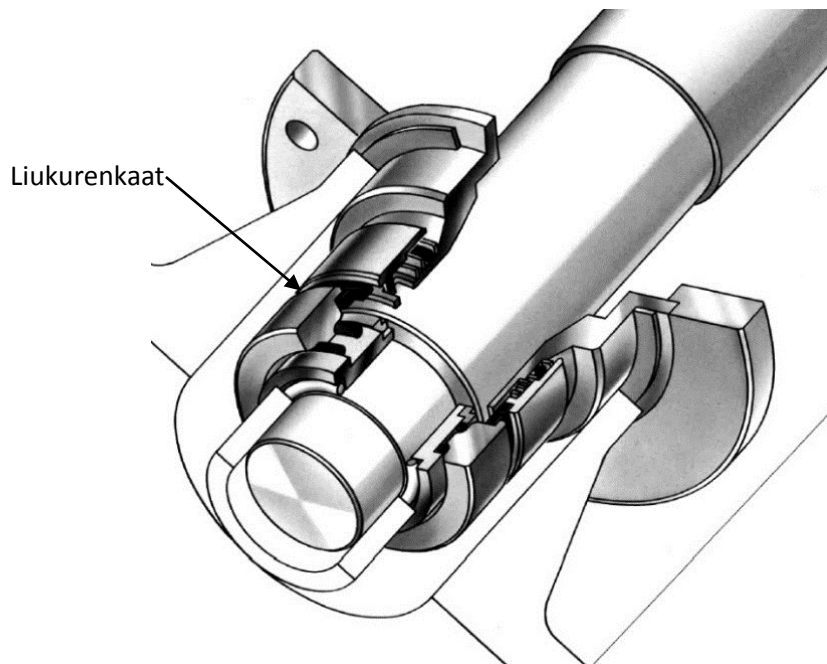
Liukurengastiivisteitä käytetään erityisesti prosessiteollisuudessa keskipakopumppujen akselitiivisteinä ja se onkin kyseisessä kohteessa yleisin tiiviste nauhatiivisteiden lisäksi. Tiivisteen sijointi keskipakopumpussa on nähtävissä kuvassa 1.



Kuva 1. Tiivisteen sijainti keskipakopumpussa.

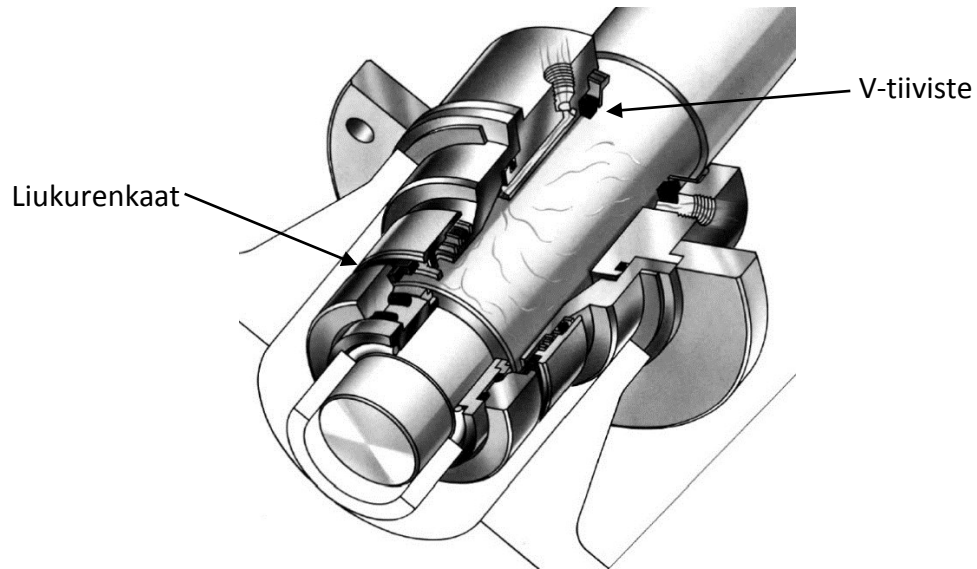
Liukurengastiiviste on nauhatiivistettä huomattavasti kalliimpi hankinta-kustannuksiltaan (vähintään yli 20-kertainen). Liukurengastiivisteessä on kuitenkin nauhatiivistettä huomattavasti pienempi vuoto, pienempi kitkateho, laajempi pyörimisnopeusalue, parempi luotettavuus ja ennen kaikkea pidempi käyttöikä. Liukurengas kestää tyypillisesti vähintään 15 000 käyttötuntia, kun taas nauhatiiviste noin 5000 h. Lisäksi liukurengastiivisteiden asentaminen jo asennettuun pumppuun edellyttää vain systeemin avaamista toisin kuin nauhatiiviste, joka vaatii systeemin purkua. [2]

Tiivistetekniikka Oy:n LP-liukurengastiivisteet (*LiukuPoksi*) jaotellaan modulaarisuudeltaan kolmeen eri kategoriaan: yksitoimiseen, yksitoimiseen paineettomaan huuhteluun sekä kaksitoimiseen tiivisteeseen. Yksitoimisessa tiivisteessä on yksi liukuparipinta ja tiiviste soveltuu kiteytymättömien nesteiden käsittelyyn. [3] Yksitoiminen tiiviste on nähtävissä kuvassa 2.



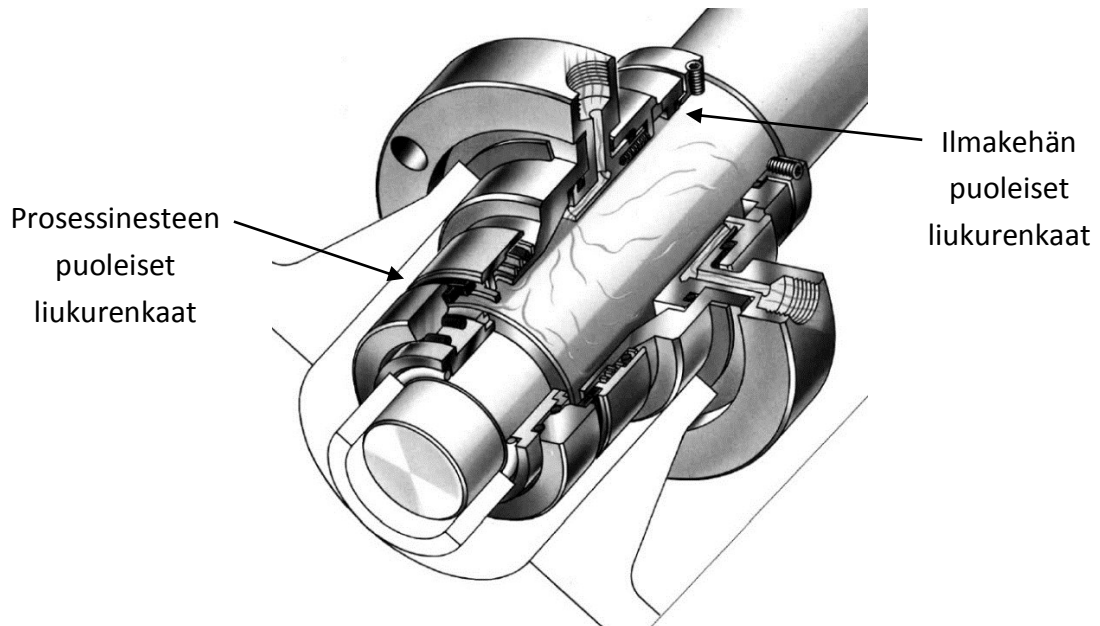
Kuva 2. Yksitoiminen LP-liukurengastiiviste. (Tiivistetekniikka Oy)

Yksitoiminen paineeton huuhtelutiiviste sisältää myös V-tiivisteellisen pesän (=quench), joka mahdollistaa sulkunesteen valuttamisen tiivisteiden sisäosien läpi. Tämä tiiviste soveltuu kiteytyvien ja 5 % kiinteää massaa sisältävien nesteiden käsittelyyn. [3] Kyseinen tiivistetyyppi on nähtävissä kuvassa 3.



Kuva 3. Yksitoiminen paineettomalla huuhtelulla toimiva LP-liukurengastiiviste. Juonteet kuvaavat virtaavaa sulkunestettä. (Tiivistetekniikka Oy)

Kaksitoimisessa tiivisteessä on yhteensä kaksi liukuparipintaa, jolloin tiivisteiden sisäosat on mahdollista paineistaa. Kaksitoimista tiivistettä voidaan myös käyttää niin sanotusti Nonflow™ tilassa, jolloin tiivisteiden sisällä olevaa sulkunestettä ei juokseteta tiivisteiden läpi. Tiiviste soveltuukin vaativiin olosuhteisiin, joissa prosessiaine on hiovia, kuluttavia tai vaarallisia veteen liukenemattomia nesteitä. Se pystyy myös käsittelemään 8 %:ti kiinteä massaista nesteitä. [3] Tiiviste on nähtävissä kuvassa 4.



Kuva 4. Kaksitoiminen LP-liukurengastiiviste. Juonteet kuvaavat sulkunestettä. (Tiivistetekniikka Oy)

3.1 MATERIAALIT

Liukurengastiivistimet joutuvat kestämaan paikoin erittäin korrosoivia nesteitä ja hiovia partikkeleita, joten materiaalivalinnoilla on suuri merkitys tiivisteen toiminnalle. Liukurengastiivistimien materiaalit on jaettavissa kolmeen eri kategoriaan: liukupintamateriaaleihin, toisiotiivistemateriaaleihin ja rakennemateriaaleihin.

Liukupintamateriaalit ovat hyvin usein keraameja (piikarbidi, volframikarbidi, alumiinioksidi), hiiltä tai erikoisseosteräksiä (kromi-nikkeli-molybdeeni). [2] Liukurengastiivisteissä nämä materiaalit ovat yleensä erillisinä renkaina, jotka liitetään ahdistussovitteisesti runkomateriaaliin. LP-liukurengastiivisteissä käytetään pääosin piikarbidia renkaitten materiaaleina. Keraamiset materiaalit kestävät hyvin lämpöä ja erittäin korrosoivia nesteitä.

Toisiotiivistemateriaalit eli käytännössä O-renkaiden materiaaleina käytetään etyleeni-, propyleeni-, fluori-, nitrili- tai silikonikumia. Myös PTFE (*Polytetrafluorieteeni, teflon*) on käytettävissä. O-rengasmateriaalit määrittävät käytännössä tiivisteen käyttölämpötilan ylärajan. [2]

Rakennemateriaalit tehdään metalleista, koska ne kestävät hyvin mekaanista kuormaa, kulutusta ja oikeilla materiaaleilla myös happamia tai emäksisiä nesteitä. Käytettävien metallimateriaalien kirjo on laaja, koska rakenteen materiaali määräytyy prosessiaineen perusteella. Yleisesti käytetään ruostumattomia teräksiä (austeniittinen) ja korroosiovaatimusten kasvaessa siirrytään duplex- ja super-duplex- teräksiin (austeniittis-ferriittinen). Hyvin syövyttävissä tapauksissa käytetään nikkeliseosmetalleja ja hapettavissa puhdasta titaania. Tiivistetekniikan yleensä käyttämät materiaalit on nähtävissä taulukosta 1. Muitakin materiaaleja käytetään (esim. zirkonium), mutta ne ovat yksittäistapauksia.

Taulukko 1. Tiivistetekniikan yleisesti käyttämät rakennemateriaalit.

Ruostumattomat teräkset	
Duplex	SAF 2205 / EN-1.4462 (Sandvik)*
Super-Duplex	SAF 2507 / EN-1.4410 (Sandvik)
Super-Duplex	SMO 654 / EN-1.4652 (Outokumpu)
Nikkeliseosmetallit	
Hastelloy	C 4 / EN-2.4610 (Haynes)
Hastelloy	C 276 / EN-2.4819 (Haynes)
Titaani	
Puhdas titaani	Grade 2/ EN-3.7035

* Suurimmassa osassa tiivisteistä

Oikean rakennemateriaalin löytäminen vaatii aina kokeilua, sillä monien nesteiden korroosiivisuus vaihtelee seossuhteen, lämpötilan ja kiinneaineen suhteen. Esimerkiksi rikkihappo on teräkselle syövyttävämpää 65 %:n seosteisena veteen kuin 99 %:na ja syövyttävyys kasvaa lämpötilan noustessa [4]. Rautanikkeliseoksien korroosiokestolle on kuitenkin olemassa suuntaa antava laskennallinen PREN-arvo (*Pitting Resistance Equivalent Number*). Mitä suurempi PREN-arvo on, sitä todennäköisemmin se kestää korrosoivia nesteitä. PREN-arvo lasketaan yhtälön (1) mukaisesti [5]:

$$PREN = w_{Cr} + 3,3 (w_{Mo} + 0,5w_W) + 16w_N \quad (1)$$

jossa w_{Cr} = kromin massaprosentti määrä seoksessa [%]

w_{Mo} = molybdeenin massaprosentti määrä seoksessa [%]

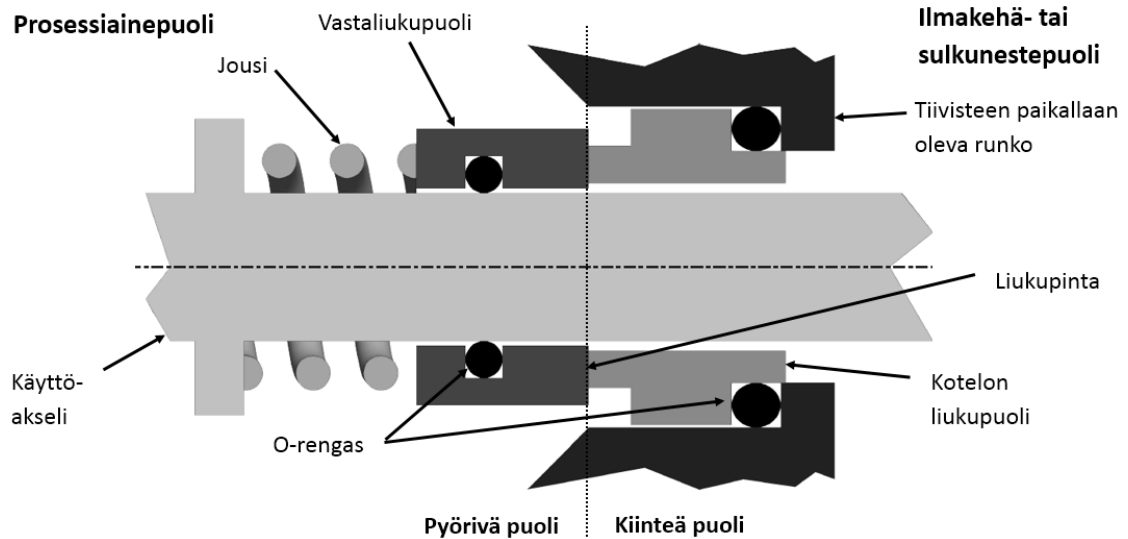
w_W = volframin massaprosentti määrä seoksessa [%]

w_N = typen massaprosentti määrä seoksessa [%]

Esimerkiksi SAF 2205:ssa on kromia 22%, molybdeeniä 3,2% ja typpeä 0,18%, joten PREN-arvoksi saadaan 35,4 [6]. Metalleissa käytetään etuliitettä ”super”, kun PREN-arvo on yli 40 [7].

3.2 MEKANIikka

Liukurengastiivisteiden perimmäinen toimintaperiaate perustuu kahteen toisiaan vasten liukuvaan pintaan. Kyseiset pinnat ovat yhdensuuntaisia toisiinsa nähden, joista runkoon kiinnitetty on paikallaan oleva ja akseliin kiinnitetty pinta pyörivä. Tiivistys saadaan aikaan puristamalla pintoja toisiaan vasten prosessinestepaineen ja jousen avulla. Koska tiiviste on mekaaninen kokoonpano, käytetään rakenneosien välissä O-rengas-tiivisteitä. Näitä O-renkaita kutsutaan liukurengastiivisteiden toisiotiivisteiksi. [2] Toinen liukupinta on yleensä jousikuormitteinen, jonka ansiosta akselin pienet suuntavirheet eivät haittaa tiivisteiden toimintaa. [8] Yksinkertaistettu halkileikkaus liukurengastiivisteestä on nähtävissä kuvassa 5.



Kuva 5. Yksinkertaistettu halkileikkaus liukurengastiivisteestä.

Liukupintojen pinnankarheudet ovat hyvin sileitä, R_a arvolla 0,1-0,25 μm mitattuna kehän suunnasta. Tätä karheampi pinta kasvattaa vuodon määrää. Pinnat eivät kuitenkaan saa olla liian sileitä, jotta prosessineeste tai sulkuneste pääsee liukupintojen väliin luomaan raja- tai sekavoitelutilanteen. Tällöin liukupintojen välinen kitkakerroin pysyy pienenä. Voitelusta aiheutuva vuoto liukupintojen välissä on kuitenkin vähäistä: 50 mm halkaisijaltaan oleva tiiviste vuotaa 0,1-10 ml tunnissa, kun pyörimisnopeus on 3000 r/min. [2]

Prosessiaineen ja ilmakehän tai sulkunesteen välinen paine-ero vaikuttaa omalta osaltaan tiivistepintojen yhteen painautumiseen. Riippuen tiivisteen geometriasta pinnat saattavat painautua liian kovasti toisiaan vasten tai niiden väli saattaa avautua. Tämän vuoksi liukurengastiiviste suunnitellaan joko hydraulisesti tasapainotetuksi tai tasapainottomaksi. Käsitteenä tälle on hydraulinen tasapainosuhte k -arvo, joka määritellään seuraavasti [9]:

$$k = \frac{A_h}{A_l} \quad (2)$$

jossa k = tasapainosuhte

A_h = tehollinen hydraulinen pinta-ala, johon prosessi- tai sulkunestepaine kohdistuu [mm^2]

A_l = liukukosketuksen pinta-ala [mm^2]

Tilanteessa $k > 1$ tiivistettä kutsutaan tasapainottomaksi ja mitä suurempi luku on, sitä todennäköisempi on liukuparin ylikuormittuminen. Tämä rakenne on kuitenkin yleisempi, johtuen olakkeettomasta akselistä. Tilanteessa $k < 1$ tiivistettä kutsutaan tasapainotetuksi, jolloin tiivistysvoima on pienempi ja lämpökehittymä vähäisempää. Liian alhaisella arvolla tosin kasvaa tiivisteiden aukeamisvaara. [2] Tavallisimmin tasapainottomien tiivisteiden k -arvo on 1,1-1,2 ja tasapainotettujen 0,6-0,9 [9]. Tasapainotetun ja tasapainottoman tiivisteiden geometrinen ero on nähtävissä kuvassa 6.

Kuvan 6 tasapainosuhteet voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä [9]:

$$k = \frac{d_u^2 - d^2}{d_u^2 - D_s^2} \quad (3)$$

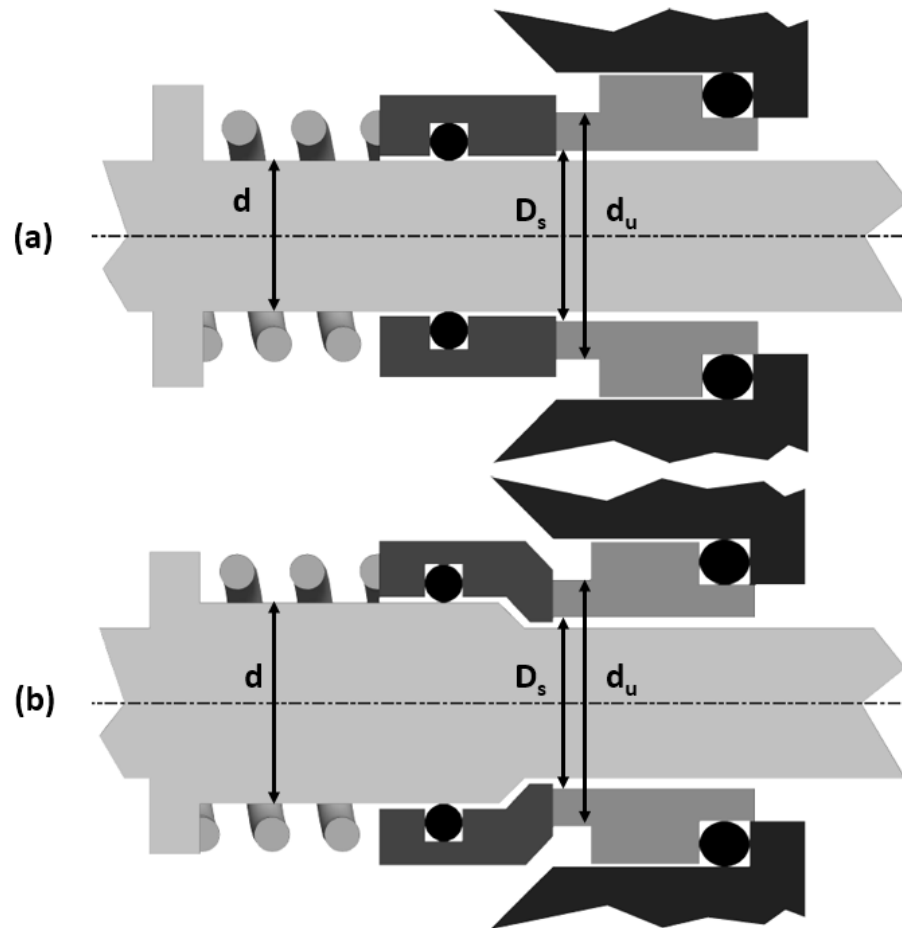
jossa d = akselin halkaisija [mm]

d_u = liukupinnan ulkohalkaisija [mm]

D_s = liukupinnan sisähalkaisija [mm]

Liukukosketuksessa on aina kitkaa ja pintojen pyöriessä toistensa suhteen kitkavoimat synnyttävät lämpöä. Lämpötilan ollessa liian suuri pintojen välinen voiteluainekalvo voi höyrystyä pois tai kavitoida. Lisäksi lämpötilahuiput voivat aiheuttaa heikentäviä muutoksia liukupintojen materiaaliominaisuuksiin. Nämä tapahtumat heikentävät entisestään liukuominaisuutta ja kasvattavat kitkaa. Liian korkeasta lämpötilasta aiheutuva lämpölaajentuma aiheuttaa kieroutumista ja lopulta pahimmillaan murtumisen. Lämpökuormaa poistetaan pääosin johtamalla kitkalämpöä tiivisteiden materiaalien läpi prosessiaineeseen tai mahdollisesti ilmakehäpuolella olevan sulkunesteen avulla. Liikkuvat nesteet kuljettavat lämpöä pois tiivisteiden luota. [1]

Kitkasta aiheutuva kitkamomentti pyrkii pyörittämään niin runkoon kuin akseliin kiinnitettyä liukupintaa. Pyörimisen ehkäisemiseksi tiivisteissä on erillisiä vääntiötappeja ja bajonettikiinnityksiä. [1]



Kuva 6. Tasapainottamaton (a) ja tasapainotettu (b) tiiviste.

3.3 VALMISTUS

Tiivistetekniikan tuotanto perustuu asiakasräätälöityihin tuotteisiin, joten yksittäinen sarja voi olla täysin erilainen kuin edellinen. Vaihtelua aiheuttavat eri materiaalivalinnat sekä asiakkaan vaatimat mitoitukset. Osien valmistus suoritetaan alihankintana ja aihiomateriaali hankitaan tarvittaessa tilauskohtaisesti. Vakiokokoiset osat, kuten ruiskuvalulla tehtävät O-renkas –toisiotiivisteet, ostetaan suoraan toimittajalta.

Liukurenkaat valmistetaan jauhosta sintraamalla eli pulveri asetetaan renkaan muotoiseen muottiin, johon sitten kohdistetaan suuri paine ja kuumuus. Paineen ja kuumuuden yhdistelmä sulattaa pulveripartikkelit toisiinsa kiinni ja jauhosta tulee tällöin kiinteä kappale. Kuumuus voidaan tuottaa myös omassa uunissa erillään paineen tuotosta. Sintrauksen jälkeen lähes määrämittaiset renkaat hiotaan vastaamaan annettuja geometrisia vaatimuksia.

Rakenneosat tehdään tällä hetkellä lastuavalla työstöllä, ja koska osat ovat pääosin pyörähdysymmetrisiä, tehdään aihion lastuaminen monitoimisorveissa. Kyseiset koneet ovat tietokone-ohjattuja CNC-koneita (*Computerized Numerical Control*), jotka tekevät kappaleita ohjelmistoon koodattujen liikeratojen perusteella. Koodin liikeradat syötetään joko suoraan koneen omasta monitorista tai erillisen CAM-ohjelman (*Computer Aided Manufacturing*) kautta. Käytettäviä työstöakselisuuntia on yleensä vähintään neljä (x,y,z,b). Pelkän sorvaustoiminnon lisäksi työkoneiden työkalupaaleissa on myös pyöriviä työkaluja, jotka mahdollistavat ahiokappaleen poraamisen ja jyrsinnän. Koneiden lastuamisteho (karateho) vaihtelee keskimäärin 5-25 kW välillä. Esimerkki monitoimisorvista on nähtävissä kuvassa 7.

Rakenneosien koneistus tehdään valmistuserissä, ja yksittäistä tiivisteiden osaa tehdään yhdellä kertaa valmistuserän verran. Tällöin osan asetusajasta syntyvät kustannukset jakautuvat mahdollisimman monelle kappaleelle. Asetusaika muodostuu ajasta, joka kuluu työstökoneen ”odotellessa” työstöohjelman tekoa, ohjelman koneeseen syöttöä, työkalujen noutoa, aihion kiinnitystä sekä testiajossa. Tämä kaikki toistuu jokaisen valmistuserän alussa. Asetusaika riippuu pitkälti osan muodosta ja edeltävässä työstössä käytetystä materiaalista. Mikäli osaa on tehty aieminkin ja edeltävän koneistuksen materiaali on sama, voi asetusajaksi olla parhaimmillaan 0,5 h [10]. Toisaalta, täysin uusi osa ja materiaalin vaihto voi pitkittää asetusajan koko työpäivän mittaiseksi (8-10 h) [11].



Kuva 7. Monitoimisorvi (Mazak Corporation).

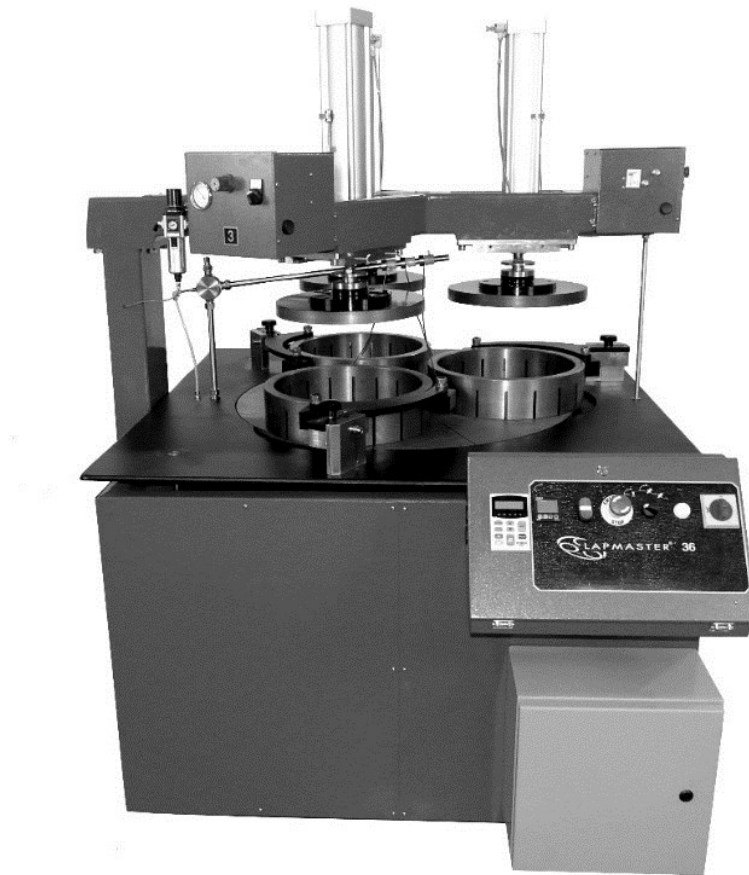
Asetusten teon jälkeen lastuaminen aloitetaan rouhintakoneistuksella. Rouhintakoneistuksessa materiaalia poistetaan suurella syöttönopeudella ja rouhintaan soveltuvilla työkaluilla. Tavoitteena on päästä mahdollisimman nopeasti ja tehokkaasti lähelle tavoiteltavaa geometriaa. Rouhinnan jälkeen suoritetaan viimeistelykoneistus, jolloin syöttönopeutta vähennetään ja sorvaustyökalut vaihdetaan viimeistelymalleihin. Viimeistelykoneistuksessa kappaleen geometria viimeistellään haluttuihin mittoihin ja pinnankarheuksiin. Mikäli haluttu mitta tai muoto on hyvin tarkka, saatetaan kappaleen antaa ”levätä” ennen vaiheen tekoa, jotta muusta koneistuksesta syntyneet jäännösjännitykset purkautuvat.

LP-liukurengastiivistimien mitta- ja geometriatoleranssit määrittävä yleistoleranssi on ISO 2768 – mK ja yleispinnankarheus on R_z 25 μm ($= R_a$ 6,25 μm), jotka ovat saavutettavissa helposti. Jotkin osat kuitenkin sisältävät tarkempia tolerointeja kuten IT 7 ja IT 8 toleroituja mittoja tai tiukkoja ympyrämaisyys vaatimuksia. Lisäksi O-renkaan kanssa kosketuksessa olevat pinnat vaativat R_z 10 μm ($= R_a$ 2,5 μm) tai R_z 5 μm ($= R_a$ 1,25 μm) riippuen siitä, että onko pinta paikallaan vain liikutettavissa O-renkaan suhteen (pinnankarheus käännökset R_z :ta R_a :ksi on tehty DIN 4768-1 / ISO 1302 – standardin mukaan). Nämä tarkat vaatimukset asettavat haasteita työstökoneelle ja sen käyttäjälle. Koneistuksen jälkeen osat toimitetaan Tiivistetekniikalle viimeistelyä varten.

Koneistetuille osille tehdään Tiivistetekniikalla tarkistusmittauksia ennen kuin niille tehdään jatkokäsittelyitä. Mikäli mitat ovat toleranssien mukaisia, siirretään osat kokoonpanoon tai krympattavaksi. Krymppaamisessa eli ahdistussovitteiden tekeminen lämpölaajenemisen avulla liukurenkaat kiinnitetään niille tarkoitettuihin rakenneosiin. Prosessissa metallikappaleet kuumennetaan materiaalista ja koosta riippuen 250-550°C:een, jolloin sovitekohta laajenee lämpölaajenemisen seurauksena suuremmaksi kuin huoneenlämpöisen liukurenkaan ulkohalkaisija. Rengas asetetaan paikoilleen käsin heti metalliosan uunista poisoton jälkeen ja jäähtyessä metallinkutistuma puristaa renkaan tiukasti paikalleen.

Krymppauksen jälkeen kappaleiden annetaan levätä muutaman päivän, jotta kaikki jäännösjännitykset häviävät. Tämän jälkeen liukurenkaiden tiivistepinnat hiotaan kolmessa eri vaiheessa vaadittuun R_a 0,1-0,25 μm :iin. Alkuun liukupinta hiotaan tasohionnalla niin, että koko pinta on varmasti hioutunut. Samalla varmistetaan pinnan olevan riittävän tasainen seuraavaa vaihetta varten. Toista vaihetta kutsutaan läppäämiseksi, jossa liukurengaspinta asetetaan pyörivän alustan päälle. Alustan päällä on hiovia partikkeleita sisältävää öljyä, joka liikkuvan pinnan ansiosta kulkeutuu renkaan pinnalle hioen pintaa sileämmäksi. Kolmas hiontavaihe tehdään niin ikään läppäämismenetelmällä, mutta käytettävät hiontapartikkelit ovat edellistä vaihetta

hienojakoisemmat. Lämpäyskone on nähtävissä kuvassa 7. Hionnan jälkeen pinta tarkastetaan valospektrin avulla.



Kuva 8. Lämpäyskone. Lämpettävät kappaleet asetetaan sylinterien sisään, jotka pysyvät paikallaan suhteessa pyörivään alustaan. (Lapmaster International LLC)

Lämpäyksen jälkeen viimeisetkin tiivisteiden osat ovat valmiita. Kokoonpanon jälkeen suoritetaan tiivisteille koeponnistukset, jossa tiivisteiden ilmakehä- tai sulkunestepuoli paineistetaan ilmalla. Tämän jälkeen tiivisteet toimitetaan Tiivistetekniikan asiakkaille.

Hyvin usein asiakastarpeiden nopea täyttäminen viivästyy tilausten työjonoon ja yksittäistapauksissa myös aihiomateriaalin löytymiseen kuluvaan aikaan. Aihiomateriaalin saatavuus on välillä haastavaa johtuen erityismetallien suhteellisen vähäisestä markkinatarjonnasta ja oikeasta aihiokoosta. Liian suurta aihiotankoa ei kannata muuttaa lastuksi pienen kappaleen takia ellei tilanteen kriittisyys niin vaadi. Johtuen edellä mainituista tekijöistä tilauksia tehdään asiakastarpeen lisäksi myös varastoon.

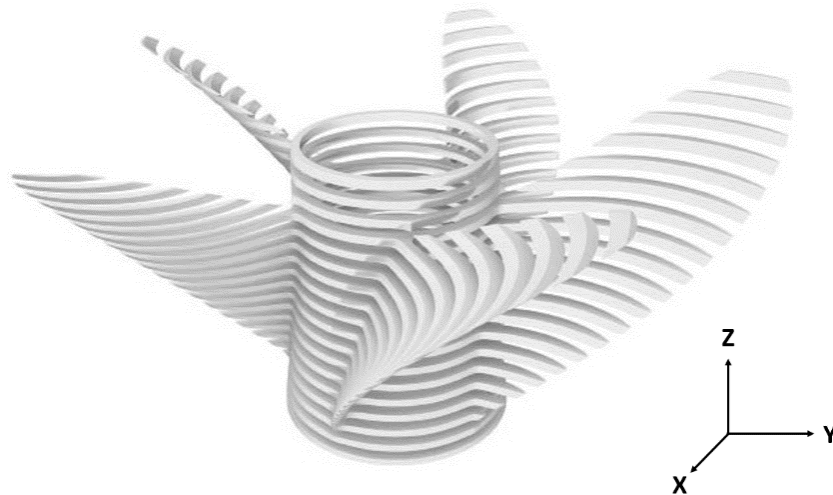
4 LISÄÄVIEN MENETELMIEN TEKNOLOGIA

4.1 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Materiaalia lisäävän valmistuksen voi valmistustekniikan näkökulmasta verrata valu-, hitsaus- tai liimausmenetelmiin. Valamista lähellä olevissa AM-menetelmissä ainesmateriaali muutetaan haluttuun muotoon nestemäisen olomuodon kautta, kun taas hitsaus- ja liimausmenetelmissä partikkeleita liitetään yhteen. Ratkaisevin ero näihin muihin valmistusmenetelmiin on, että kappaleen muodon muodostuminen tapahtuu lisäävissä menetelmissä mikrometrien tasolla tietokoneohjatusti. Lisäksi lisäävillä menetelmillä kyetään tekemään huomattavan monimutkaisia rakenteita. Koko rajoituksena on kuitenkin koneen valmistuskammion tilavuus.

Tietokoneohjauksen merkittävyys on huomattava, sillä AM-teknologiaa edustavia koneita on käytännössä mahdotonta ohjata manuaalisesti. Lisäksi kappaletta on mahdotonta tehdä ilman, että siitä olisi olemassa 3D-mallia. Lisäävät menetelmät eivät kuitenkaan vaadi erillisiä muotteja tai jigejä ja kehittynyt automaatio mahdollistaa suhteellisen hyvän helppokäyttöisyyden. Näiden ansiosta AM-menetelmät ovat valmistustekniikan kannalta erittäin joustavia valmistustapoja. Vastuu kappaleen ominaisuuksista siirtyy kuitenkin enemmissä määrin suunnittelulle, koska koneet tekevät liikeratansa täysin 3D-mallin mukaan. Jotta lisäävistä menetelmistä saataisiin kaikki mahdollinen hyöty, on kappaleen suunnittelussa osattava ottaa huomioon lisäävien menetelmien mahdollisuudet ja optimoida kappaleiden muodot menetelmää hyödyntäväksi niin kustannuksien kuin kappaleen käsittelijöiden osalta. Optimointi ilmenee muun muassa suurien massakeskittymien poistamisena sekä tukimateriaalin minimoinnissa. [12] DFMA:n (*Design For Manufacturing and Assembly*) ajatukset on tästä syystä hyvä pitää mielessä.

Tämän hetkiset AM-menetelmät perustuvat niin sanottuun "layer-by-layer"-tekniikkaan, jossa kappale muodostuu kerros kerrokselta. Valmistussuunta määritellään karteesisen koordinaatiston mukaisesti x-, y- ja z-suuntiin. 3D-mallit paloitellaan CAM-ohjelmalla z-suuntaan nähden xy-tasoksi, joiden paksuus on yhtä paljon kuin asetettu rakennuskorkeus kerrokselle. Kerrospaksuus vaikuttaa "resoluutioon", joka kuvaa AM-kappaleen vastaavuutta 3D-malliin nähden. z-suuntainen resoluutio paranee kerrospaksuuden ohenemisen myötä joskin valmistusnopeuden kustannuksella. Kerrospaksuudet vaihtelevat 10-100 µm ja 0,1-0,5 mm väliltä menetelmästä riippuen. [12] Esimerkki 3D-mallin siivutuksesta on nähtävissä kuvassa 9.



Kuva 9. Kappale siivutettuna tasoiksi valmistuskerrospaksuuden mukaan. (Opintomateriaali, Jouni Partanen)

Kerroksisuudesta johtuen, lisäävien menetelmien kappaleet ovat aina anisotrooppisia eli niiden ominaisuuksissa on eroja valmistussuuntiin nähden. Tämä ilmenee muun muassa myötö- ja murtorajoissa, joissa kappale on yleensä z-suuntaan heikompaa kuin xy-suuntiin. [12]

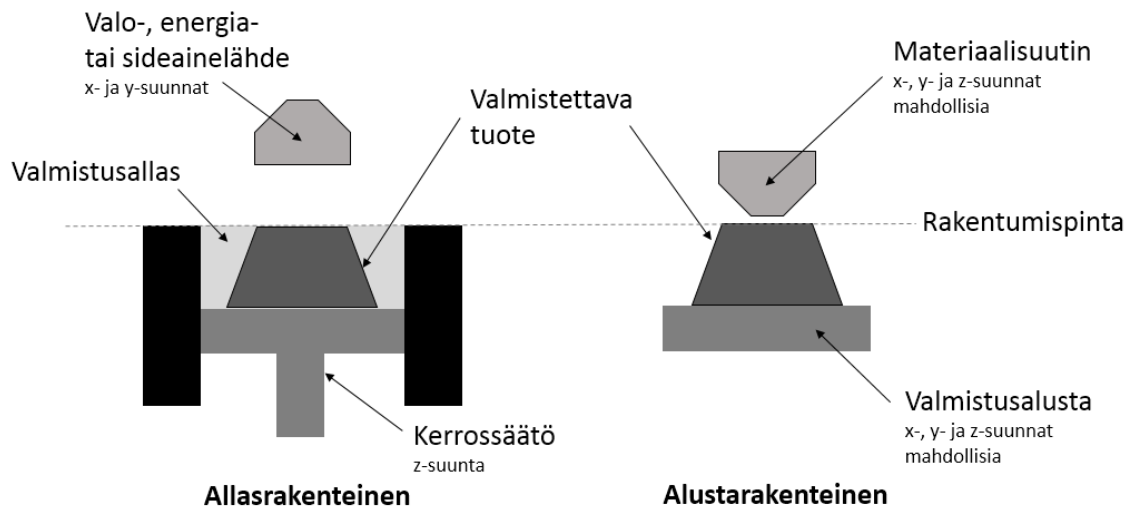
4.1.1 LISÄÄVIEN MENETELMIEN JAOTTELU

Monilla laitevalmistajilla on omat kauppanimensä kehittämilleen menetelmilleen, joten samanlaiselle systeemille voi olla monia eri termejä. ASTM:n (*American Society for Testing and Materials*) standardilla menetelmät luokitellaan seitsemään kategoriaan, joilla ei ole vielä virallisia suomenkielisiä käännöksiä [13]:

- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| • Vat Photopolymerization | "Valokovetusmenetelmä" |
| • Powder Bed Fusion | "Pulveripetisulatusmenetelmä" |
| • Binder Jetting | "Sideainemenetelmä" |
| • Sheet Lamination | "Laminointimenetelmä" |
| • Material Extrusion | "Pursotusmenetelmä" |
| • Material Jetting | "Suihkutusmenetelmä" |
| • Directed Energy Deposition | "Hitsausmenetelmä" |

Kyseiset menetelmä on karkeasti lajiteltavissa kahteen ryhmään ainesmateriaalin käsittelyn perusteella: allas- ja alustarakenteisiin. Listan neljässä ensimmäisessä menetelmässä kappaleen voidaan sanoa muodostuvan altaassa, johon kappaleen tarvitsema ainesmateriaali tuodaan. Listan kolmessa viimeisessä menetelmässä kappale voidaan sanoa muodostuvan alustan päälle, joissa ainesmateriaali asetetaan suoraan

siivutetun alueen määrittämälle alueelle. Allas- ja alusta rakenteisten menetelmien erottelu on nähtävissä kuvassa 10.



Kuva 10. Lisäävien menetelmien rakenteelliset erot.

Allasrakenteisessa kappaleen muodostuminen tapahtuu suoraan ainesmateriaaliin eli valmistusprosessin loppuvaiheessa osa altaan tilavuudesta on kappaletta ja osa ainesmateriaalia. Valokovetuksessa käytettävä ainesmateriaali on nestemäisessä olomuodossa, pulveripetisulatus- sekä sideainemenetelmissä jauhetta ja laminointimenetelmissä levynä. Menetelmien etuina on mahdollisuus tehdä kappaleita ilman tukimateriaaleja, mutta niissä ei voi käyttää eri materiaalia samassa kerroksessa. Eri materiaalien käyttöä näissä menetelmissä ei muutoinkaan ole yleistä.

Valokovettuvissa menetelmissä ainesmateriaali kovetetaan altaan valolähteen vastaiseen pintaan kerros kerrokselta nesteestä kiinteäksi valon avulla. Pulveripetisulatus- ja sideainemenetelmissä ainesmateriaali levitetään kerrokseksi lanan avulla. Tämän jälkeen pulveripetisulatusmenetelmässä kerroksen jauhetta sulatetaan yhteen lasersäteen tai elektronisuihkun avulla siivutetun tasoalueen määrittämältä alueelta. Vastaavasti sideainemenetelmässä jauheeseen ruiskutetaan nimensä mukaisesti sideainetta kuten liimaa. Laminointimenetelmässä kerrospaksuus on sama kuin levyn paksuus. Levy leikataan laserilla tai leikkuuterällä siivutetun tasoalueen määrittämään muotoon. Kerrokset liitetään yhteen joko sideaineella, ultraäänihitausuksella tai lämpökäsittelmällä. Ylimääräinen neste tai jauhe on heti uusiokäytettävissä, mutta laminoinnista ylijäävät nestit eivät sovellu muuksi kuin kierrätysjätteeksi. [12]

Alustarakenteisissa ainesmateriaali asetetaan heti kappaleen muotoon. Tosin riippuen kappaleen geometriasta, kappaleen rakentamisen yhteydessä on myös tehtävä erillisiä tukirakennelmia, sillä ainesmateriaali tarvitsee aina alustan, johon kiinnittyä. Näiden menetelmien etuna on mahdollisuus käyttää eri ainesmateriaaleja samassa kappaleessa valmistusprosessin yhteydessä. Esimerkiksi tukimateriaali voi olla erikseen vesiliukoista, jolloin sen poistaminen helpottuu huomattavasti. Lisäksi materiaalia on mahdollista lisätä myös eri suunnista, mikäli koneen ohjaus kykenee siihen. Tätä ominaisuutta ei kuitenkaan ole tällä hetkellä juurikaan omaksuttu.

Pursotusmenetelmissä ainesmateriaalia tuodaan lankana suuttimeen, jossa ainesmateriaali muutetaan juoksevaan olomuotoon useimmiten lämmöllä sulattamalla. Suutin asettelee ainesmateriaalin siivun määrittämälle alueille ”nauha” kerrallaan ja aines sulaa kiinni alla olevaan kerrokseen. Tämän paksuus on yhtä paljon kuin kerrospaksuus. Menetelmä soveltuu hyvin amorfisille aineille, kuten muoveille. Suihkutusmenetelmässä materiaali suihkutetaan tai annetaan pudota suuttimesta pieninä pisaroina kohti valmistuspintaa, johon ainesmateriaali kovettuu. Materiaalista ja koneesta riippuen, kovettumista voidaan hallita UV-valon avulla. Pienen materiaalilisäämisen ansiosta menetelmällä kyetään tekemään melko tarkkoja kappaleita. Hitsausmenetelmässä suuttimesta kohdistetaan jauhesuihku tai jatkuvasyöttestä lankaa haluttuun kohtaan. Ainesmateriaali sulatetaan alempaan kerrokseen niin ikään suuttimesta lähtevän energiasäteen avulla. [12]

4.1.2 SUUNNITELMASTA TUOTTEEKSI

Lisäävän valmistuksen prosessiketju jakautuu kahdeksaan vaiheeseen [12]:

1. Kappaleen suunnittelu ja 3D-mallin teko
2. 3D-mallin muuttaminen stl-tiedostoksi
3. Stl-muotoisen 3D-mallin paikan määrittäminen koneessa
4. Koneparametrien syöttäminen
5. Koneajo
6. Koneesta poisto ja puhdistus
7. Jälkiprosessointi
8. Käyttö

Kuten jokaisessa tuotesuunnitteluprosessissa kappaleen muoto ja halutut toiminnalliset piirteet pitää olla olemassa ennen valmistusvaihetta. Lisäävissä menetelmissä valmis design ilmenee valmiin 3D-mallin muodossa. Tämän jälkeen 3D-malli muutetaan 3D-ohjelman omasta tiedostomuodosta yleiseen stl-muotoon (*stereolithography* [file

format)), jota lisäävien menetelmien CAM-ohjelmat osaavat käyttää. Konvertoinnissa 3D-mallin pintamuodot muutetaan pienten kolmioiden verkostoksi ja mitä pienempiä kolmiot ovat, sitä tarkempi stl-mallista ja lopullisesta kappaleesta tulee. Stl-mallin avulla kappaleen valmistuspaikka ja -suunta koneessa määritellään koneen valmistajan CAM-ohjelmassa. Samaisessa ohjelmassa tehdään kappaleen siivutus ja koneen ratojen ja ohjauksen generointi. Esimerkiksi pursottavissa menetelmissä käytetään koneen ohjauksessa samanlaista koodikieltä kuin CNC-lastuamiskoneissa eli G-koodiksi kutsuttua ohjelmointikieltä. [12]

Kun rataohjaus on valmistunut ja koneen asetukset (oikeat materiaalit, mekanismin kalibrointi ym..) ovat valmiita, voidaan käynnistää kappaleen valmistus. Koneajo toimii täysin automaattisesti, joten käyttäjän tarvitsee tulla koneen luokse uudelleen vasta kappaleen valmistuttua. Valmistusta kannattaa silti silloin tällöin tarkastaa mahdollisten häiriötekijöiden varalta. Koneajon loputtua tuote on irrotettava koneesta ja puhdistettava ainesmateriaalinsteestä tai -pulverista tai/sekä poistettava tukimateriaalit. Nämä työt on tehtävä käytännössä aina manuaalisesti. Monissa tapauksissa tuote ei ole vielä valmis vaan sitä saattaa joutua vielä hiomaan, poraamaan, sorvaavaan, jyrsimään, kiillottamaan tai jopa pinnoittamaan. Mikäli vastaavaa tuotetta ei ole aikaisemmin tehty vaadittuun käyttökohteeseen, on tuotteen käytössä syytä olla alkuun tarkkaavainen uuteen teknologiaan liittyvien tuntemattomuustekijöiden takia. [12]

4.1.3 KÄYTTÖFILOSOFIAT

Tuotantotekniikassa on lukuisia eri filosofioita eri toimintatavoille, kuten yleisimpinä esimerkkeinä vanha Fordismi ja nykyisin vallalla oleva Lean-tuotantofilosofia. Lisäävä valmistus on kuitenkin sen verran uutta teknologiaa, ettei sen vaikutukset ole vielä muuttaneet nykyisiä tapoja valmistaa tuotteita. AM-teknologian sisälle on kuitenkin jo muodostunut omia tuotantofilosofiota, kuten DFAM (*Design For Additive Manufacturing*), jossa tuotesuunnittelua tehdään lisääviä menetelmiä hyödyntäen [12].

AM-teknologia mahdollistaa monenlaisten kappaleiden valmistamisen erilaisiin käyttökohteisiin. Korkeatasoisilla laitteilla on tehty avaruusteollisuuden osia [14] ja 2010-luvun taitteessa kuluttajamarkkinoille tuoduilla ”3D-printtereillä” ovat ihmiset päässeet toteuttamaan omia luomuksiaan [15]. Teknologian suuren käytettävyyden vuoksi sen käyttöfilosofiat voidaan luokitella kolmeen eri luokkaan: informaatio-, spesifi- ja tuotantovalmistukseen. Näin käyttötarkoitusten erot on selitetty tarkemmin taulukossa 2.

Taulukko 2. Lisäävien menetelmien käyttöfilosofiat.

	Tarkoitus	Toimintaperiaate	Tuotos	Painoarvo	Materiaalit
Informaatio- valmistus	Ilmaisun väline tai tuottaa tietoa. (taide, protoilu...)	Valmistusprosessi ja koneen operointi tehty käyttäjälle mahdollisimman helpoksi	Ilmaisee käyttäjän ajatuksia tai antaa tietoa.	Haluttu kappale pyritään valmistamaan mahdollisimman vähällä vaivalla.	Mahdollisimman edullisia ja yksinkertaisia käyttää.
Spesifi- valmistus	Tuotetaan yksi täysin yksilöllinen kappale. (luuimplantti, korjaava työ)	Tuotetaan yksittäiskappaleita, joiden valmistaminen on hankalaa tai mahdotonta muilla valmistusmenetelmillä.	Useimmiten uniikkituote, joka vastaa asetettuja vaatimuksia.	Tehdään erittäin räätälöity tuote hyvin spesifiin tehtävään. Kustannuksilla ei ole niin väliä.	Käyttökohteeseen tarkalleen suunniteltuja
Tuotanto- valmistus	Keskitytään kappaleiden kilpailukykyyn. (kone-elimet, käyttöesineet)	Hyödynnetään lisäävän valmistuksen ominaisuuksia sarjatuotettaviin kappaleisiin.	Täyttää asetetut teknilliset vaatimukset. Muotoja optimoitu menetelmää hyödyntäväksi.	Tuotteiden kilpailukyky sekä valmiit kappaleet per aikayksikkö.	Kustannustehokkaat ja vastaavat teknisiä vaatimuksia

Informaatiovalmistus on käytännössä sitä, mihin lisääviä menetelmiä on alkujaan käytetty eli prototyyppien valmistukseen. Prototyyppien tarkoituksena on tuottaa tietoa suunnittelijalle hänen tuotteensa ominaisuuksista jo ennen varsinaista tuotantovaihetta. Lisäksi AM-koneilla voi ilmaista itseään taiteellisin luomuksin [16]. Spesifivalmistus nojaa AM-teknologian yksinkertaiseen mekaniikkaan ja täysin tietokoneohjattuihin koneisiin. Nämä kaksi piirrettä mahdollistavat erikokoisten ja erilaisten käyttökappaleiden teon, joiden eräkkö on vain yksi. Esimerkiksi ihmisen luuimplantit toimivat parhaiten, kun ne on suunniteltu ja valmistettu juuri kyseisen kehon mukaisesti [17]. Tuotantovalmistusta eli useamman kappaleen erätuotantoa ei vielä ole olemassa juurikaan muualla kuin pienessä mittakaavassa ilmailuteollisuudessa, mutta se on jatkuvan tutkimuksen kohteena [18] [19].

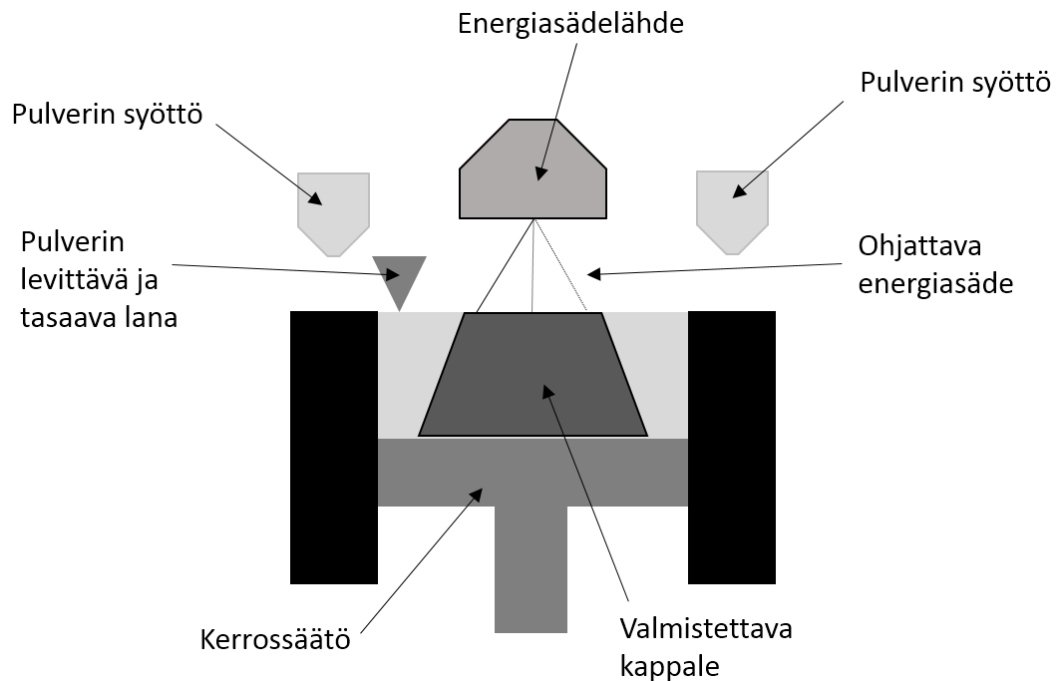
4.2 METALLISET PULVERIPETISULATUSMENETELMÄT

Lisäävien menetelmien kategorioista metallikappaleiden tuotantoon soveltuvat tällä hetkellä laminointimenetelmä (*Sheet Lamination tai Laminated Object Manufacturing, LOM*), sideainemenetelmä (*Binder Jetting*), hitsausmenetelmä (*Direct Energy Deposition, DED*) ja pulveripetisulatusmenetelmä (*Powder Bed Fusion, PBF*). Menetelmät poikkeat toisistaan niin tuotantokoneen rakenteen kuin materiaalin liittämismenetelmien perusteella.

Allasrakenteinen laminointimenetelmä ei sovellu kovinkaan hyvin liukurengastiivisteiden valmistukseen johtuen suuresta hukkamateriaalista ja valmiin kappaleen suuresta anisotropiasta. Lisäksi kappaleiden muotojen vapaus on huomattavasti rajatumpaa kuin kolmella muulla aikaisemmin mainitulla menetelmällä [12]. Niin ikään allasrakenteinen sideainemenetelmä ei ainakaan tällä hetkellä sovi liukurengastiivisteiden tekoon. Metallisia kappaleita joudutaan lämpökäsittämään useaan otteeseen, jotta metallipartikkelit sintrautuisivat toisiinsa kiinni [12]. Tämä luo haasteita kappaleen mittojen hallinnalle.

Alustarakenteinen hitsausmenetelmä on AM-teknologian kannalta huomattavan tehokas muodon tuottamisessa (jopa $0.5 \text{ kg/h} \approx 70 \text{ cm}^3/\text{h}$ [20]). Menetelmän haasteita ovat kuitenkin tällä hetkellä koneen toistotarkkuus ($\pm 0,25 \text{ mm}$ [20]). Lisäksi kappaleen materiaaliominaisuuksien hallinta on vaikeaa johtuen suuren energiamäärän jäähtymisestä ja vaihtelevasta kerrospaksuudesta, jotka aiheutuvat ainesmateriaalin tuomisesta paineilmalla [12]. Hitsausmenetelmää sovelletaankin tällä hetkellä korjaavaan työhön [21].

Allasrakenteinen pulveripetisulatusmenetelmä jakautuu tällä hetkellä energialähteensä mukaan laser- ja elektronisuihkumenetelmiin. Lasermenetelmistä on olemassa monenlaisia termejä johtuen konevalmistajien halusta erottaa kehittämiensä menetelmän muista. Menetelmästä käytettäviä termejä ovat mm. *Selective Laser Sintering (SLS)*, *Laser Sintering (LS)*, *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*, *Selective Laser Melting (SLM)*. Termeissä ilmenevä ”sintraus”-sana on nykyään hieman harhaan johtava, sillä näissä menetelmissä on tavoitteena saada metallipartikkelit sulamaan. Elektronisuihkumenetelmästä käytetään termiä *Electron Beam Melting (EBM)*. PBF-menetelmän yleisperiaate on nähtävissä kuvassa 11.



Kuva 11. Pulveripetisulatusmenetelmä.

Pulveripetisulatusmenetelmä on yksi varhaisimmista lisäävistä menetelmistä ja ensimmäinen aiheeseen liittyvä patentti on jo vuodelta 1971 ranskalaisen Pierre Ciraudin tekemänä. Nykyisin käytetty pulverin levitysmenetelmä ja kappaleen kerrosrakennustekniikka patenttoitiin yhdysvaltalaisen Ross Housholderin toimesta 70-luvun lopulla. Yhdysvaltalaisen Chuck Hullin perustama 3D Systems Inc. loi 1980-luvun puolivälissä kehittelemänsä stereolithografian avulla kaupallisen käsitteen lisääville menetelmille. Yritys määritteli pitkälle AM-teknologiaa, kuten CAM-ohjelmiin syötettävän 3D-mallin stl-tiedostomuodon ja sen viipalointimenetelmän sekä koneen ohjaukseen liittyviä tekniikoita. Samoihin aikoihin yhdysvaltalaisen yliopiston startup-yritys DTM Corp. (*DeskTop Manufacturing*) loi "SLS"-käsitteen lasersintrauksesta, jossa materiaalina käytettiin ABS-muovipulveria. [22]

Ensimmäinen markkinoille tarkoitettu lasersintraukseen perustuva kone tuotiin DTM:n toimesta vuonna 1992, jota seurasi kahta vuotta myöhemmin saksalaisen EOS GmbH:n julkaisema laite. Kyseiset koneet käyttivät ainesmateriaalina polymeeripulveria, mutta metallisia kappaleita pystyttiin myös tekemään perinteisen sintraamisen avulla. Tällöin metallipulveripartikkelit on päällystetty polymeereillä ja kone tekee niin sanotun "vihreän osan", jota sitten uunissa kuumennetaan niin kauan, että metallipartikkelit sintrautuvat toisiinsa kiinni lämmön vaikutuksesta. Polymeerit poistuvat osasta alkulämmityksen aikana. Kyseistä menetelmää kutsutaankin "epäsuoraksi metalliprosessiksi" (*indirect metal process*). [22]

Varsinainen ”suora metalliprosessi” tuli markkinoille EOS:in toimesta vuonna 1995, jota yritys kutsuu DMLS-menetelmäksi. DMLS:ssä sovelletaan suomalaisen Olli Nyrhilän kehittelemää paineetonta ja vähäisen kutistuman sintrausta. DTM myytiin 2001 3D Systemsille, jolta EOS hankki pari vuotta myöhemmin oikeudet DTM:n aikaisiin patentteihin. EOS omistaakin tästä syystä suuren osan tärkeistä tekniikkaan liittyvistä oikeuksista, mutta myy niistä lisenssioikeuksia myös kilpailijoilleen. [22] Nyrhilän johtaman EOS Finland Oy vastaa EOS-yrityksen metallimateriaalien ja -prosessien kehittämisestä [23]. Laserille vaihtoehtoinen elektronisuihkuun perustuva EBM-menetelmän julkaisi ruotsalaisen Arcam AB:n vuonna 2002 [24].

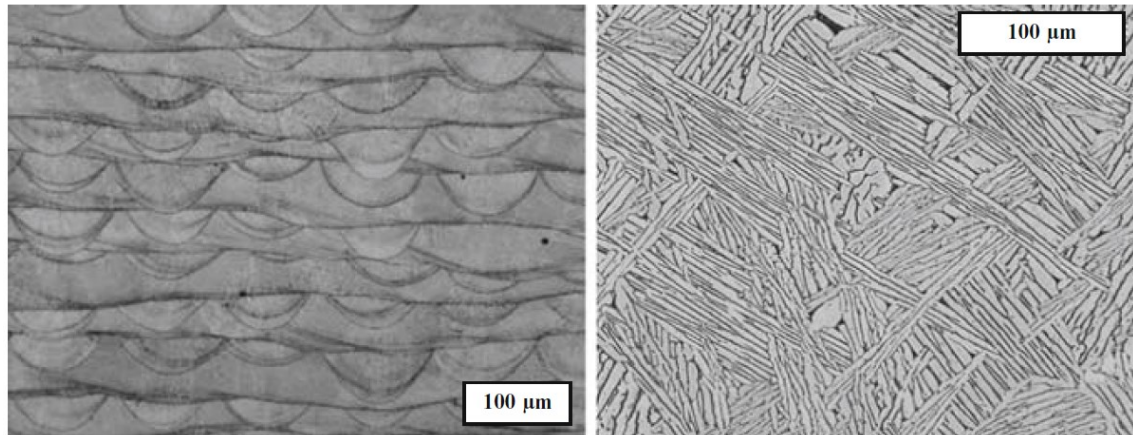
4.2.1 PULVERIMETALLIT

Metallipulverin valmistamiseen käytetään joko kiinteän aineen mekaanista hienontamista tai aineen sulan muodon atomisointia. Mekaanisessa menetelmässä kiinteä aine muutetaan hionnalla ja jauhamisella pieneksi rakeeksi ja tämän jälkeen pulveriksi. Atomisaatiossa aine kuumennetaan sulaan muotoon, josta sulamateriaali johdatetaan atomisoitavaksi. Yleisimpiä atomisointimenetelmiä ovat kapilaari-ilmiöön perustuva tiputus, rikkomalla sula pieniksi partikkeleiksi kohdistamalla tippuvaan sulaan korkeapaineinen kaasu- tai nestesuihku sekä tippuvan sulan rikkominen pieniksi partikkeleiksi keskipakoilmiön avulla. Menetelmistä syntyvästä pulverista prosessoidaan vielä pois mahdolliset kuona- ja haitta-aineet, kuten oksidit, karbonaatit, nitridit ja halogeenit. Haluttu partikkelikoko varmistetaan siivilöinnillä. [25] Lisäävissä menetelmissä käytetään yleensä atomisointimenetelmää [23].

PBF-menetelmissä pulveripartikkelin koolla on erittäin suuri merkitys, sillä mitä pienempiä pulverin partikkelit ovat, sen paremmin niiden sulatus on hallittavissa. Käytännössä tämä tarkoittaa parempaa kappaletarkkuutta ja pienempää pinnankarheutta. Pieni pulverikoko aiheuttaa kuitenkin haasteita pulverin käsittelyn suhteen. Näistä haasteista ensimmäinen on partikkelien välisen kitkan ja elektrostaattisten voimien kasvu, mitkä heikentävät pulverin juoksevuutta ja levitettävyyttä. Toinen haaste on partikkelin suuri pinta-ala suhteessa tilavuuteen, mikä kasvattaa pulverin alttiutta reaktioihin esimerkiksi ilmakehän hapen kanssa. Liian kevyet partikkelit saattavat myös jäädä ilmaan leijumaan haitaten energiasäteen kulkua. Kukin laitevalmistaja on kehittänyt omia järjestelmiään näiden ongelmien selvittämiseksi, kuten ensimmäisen haasteen kompensointiin käytettävä ultraäänellä värisevä lana. [12]

Laser- ja elektronisuihkumenetelmillä tehtävien kappaleiden kiderakenteet eroavat huomattavasti toisistaan. Laseria käytettäessä energiasäde kohdistuu hyvin lyhyen ajan

pienelle alueelle, jolloin säteen siirtyessä eteenpäin sulatettu alue jäähtyy nopeasti. Tällöin syntyy erittäin pienikiteinen metallirakenne. Elektronisuihkua käytettäessä käsitelty kerros lämmitetään säteen avulla ennen uuden kerroksen lisäämistä. Tästä seuraa, että kiteellä on enemmän aikaa kasvaa ja siksi EBM-kappaleiden metallirakenne on suurikiteisempää. Kiderakenteiden erot ovat nähtävissä kuvassa 12.



Kuva 12. Vasemmalla lasersintratun CoCrMo ja oikealla elektronisulatetun Ti6Al4V mikrorakenteet.
[12]

Lasermenetelmillä tehdyt kappaleet on mahdollista lämpökäsitellä prosessin jälkeen, jolloin kidekokoa kyetään kasvattamaan. Tällöin lasersintratun tuotteen lujuusominaisuudet kuitenkin heikkenevät. Käytettäessä titaania kiderakenteet voivat olla pidempiä kuin mitä kerrospaksuus on. [26]

Pulverimateriaalit olivat alkuun niin sanotusti räätälöityjä materiaaleja vain lasersintraustarkoituksiin, mutta teknologian kehittyessä ja asiakasvaatimusten kasvaessa entistä enemmän on tehty pulverimateriaaleja, jotka vastaavat markkinoilla olevia standardimetalleja. [26] Tällä hetkellä markkinoilta löytyy laitevalmistajien toimittamia ruostumattomia teräksiä (EN-1.4542, EN-1.14540, 316L), työkaluteräksiä (EN-1.2709), superseoksia (CoCr, Inconel 625, Inconel 718) ja kevytmetalleja (seostettu titaani, AlSi10Mg). [27]

Perinteisenä markkinametallilla nimetty AM-metalli vastaa valmistajan mukaan kyseistä ainetta pulverisessa olomuodossaan [23]. Materiaalin ominaisuudet muuttuvat sädesulatusprosessin yhteydessä juuri aikaisemmin mainitun omalaatuisen kiderakenteen muodostumisen takia. Esimerkiksi EOS:n toimittama ”EOS StainlessSteel 316L”- ruostumattoman teräksen myötöraja on valmiissa kappaleessa lähes kaksi kertaa suurempi kuin niin sanotusti tanko-AISI 316L:n [28] [29]. Lisäksi kyseisellä teräksellä ei tapahdu tankomateriaalin tapaan hystereesiä, eli materiaalin kemiallinen korroosion

kesto palautuu happohyökkäyksen jälkeen alkuperäiseen vahvuuteen. Hintakehitykseltään pulverimetallit seuraavat raaka-aineiden hintakehitystä. [23]

Pulverimateriaalin ominaisuuksilla on myös merkittävä rooli kappaleen mittatoleranssien ja valmistusnopeuden kanssa. Jotta lopullinen kappale täyttäisi vaaditut mitat, koneen parametrit on säädettävä kyseiselle materiaalille sopiviksi kuten esimerkiksi kutistuman suhteen (kerrospaksuus, säteen teho, skannausnopeus). Tämän takia valmistusnopeus, mittatarkkuus ja pinnankarheus ilmoitetaankin materiaalitiedoissa. Koneissa voidaan käyttää myös ei-valmistajan pulvereita, mutta tällöin vastuun kantaa käyttäjä ellei kyseiselle pulverille ole laitteen valmistajan hyväksyntää. [30]

4.2.2 TEKNIikka

Pulveripetisulatuksen perimmäinen olemus perustuu metallisen pulveriainesmateriaalin valikoivaan sulattamiseen energiasäteen avulla. Energiasäde kohdistetaan viipaloidun kerroksen määrittämille alueille eli tehdään niin sanotusti ”skannaus”. Säde absorboituu ainesmateriaaliin lämmittäen sen sulaan tilaan. Samalla sulanut ainesmateriaali kiinnittyy alempaan kerrokseen ja jäähtyessään muodostaa kiinteää kappalemateriaalia. Tämä toistuu jokaisella levitetyllä kerroksella. Vaikka energiasäde saataisiin kohdistettua tarkasti kappaleen siivun muotojen mukaisesti, sulatuksesta aiheutuu skannaamattoman pulverin kiinnittymistä kappaleen ulkoreunoille. Tämä näkyy niin pinnanlaatua karheuttavana sekä kappaleen mittoja heittelevänä tekijänä. [12]

Koneissa käytettäviä parametreja voidaan jaotella neljään eri kategoriaan [12]:

- **Energialähdeparametrit**
Sädeteho, kohdistuksen koko, pulssin kesto ja taajuus
- **Skannausparametrit**
Skannausnopeus, skannausrakoväli, skannauskuvio
- **Pulveriparametrit**
Pulveripartikkelin muoto ja koko, levitys, pulveripedin tiheys, kerrospaksuus, materiaalin yleisominaisuudet
- **Lämpötilaparametrit**
Pulverin lämpötila, syöttimen lämpötila, lämpötilan tasaisuus

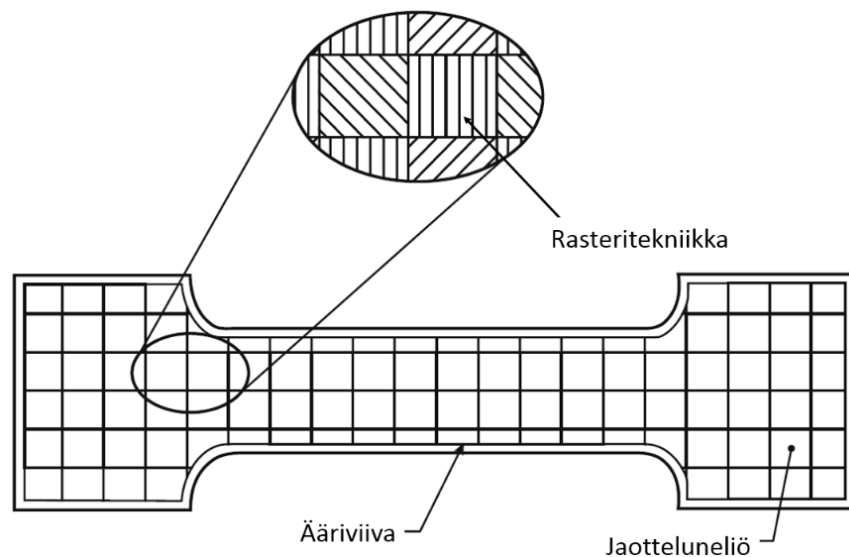
Monet näistä parametreista ovat riippuvuussuhteessa toisiensa kanssa. Esimerkiksi säteen kohdistuksen kokoa kasvattamalla alueen skannauskertoja voidaan vähentää, mutta silloin energiatehon on kasvettava suuremman sulatuspinta-alan takia. Lisäksi

Jani Renvall

Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulu

skannausnopeudella voidaan vaikuttaa kappalemateriaalin tiheyteen: mitä hitaammin skannataan eli mitä pidempään säde vaikuttaa materiaaliin, sitä varmemmin pulveripartikkelit sulavat täydellisesti muodostaen umpiainesta [22].

Energiasäteen skannausstrategiana käytetään yleisesti joko ääriivamuotoa tai täyttömuotoa. Ääriivamuodossa energiasädettä kohdistetaan siivutetun tason reunapiirteiden mukaisesti. Täyttömuodossa on niin sanotusti rasteritekniikka, jossa sädettä liikutetaan toisen liikeakselin suuntaisesti edestakaisin toisen liikeakselin siirtäessä tätä liikettä eteenpäin pykälittäin. Käytännössä näitä muotoja yhdistetään samassa skannauskerrassa, jolloin rasteritekniikalla täytetään siivun sisäosat ja siivun ulko-osat viimeistellään ohjaamalla sädettä ääriviivojen mukaisesti. Lämpölaajentuman ja -kutistuman hallintaa voidaan parantaa jakamalla täyttöalue pieniin neliöihin, joita sitten rasteriohjauksella sulatetaan satunnaisessa järjestyksessä. [12] Skannausstrategiat on nähtävissä kuvassa 13.



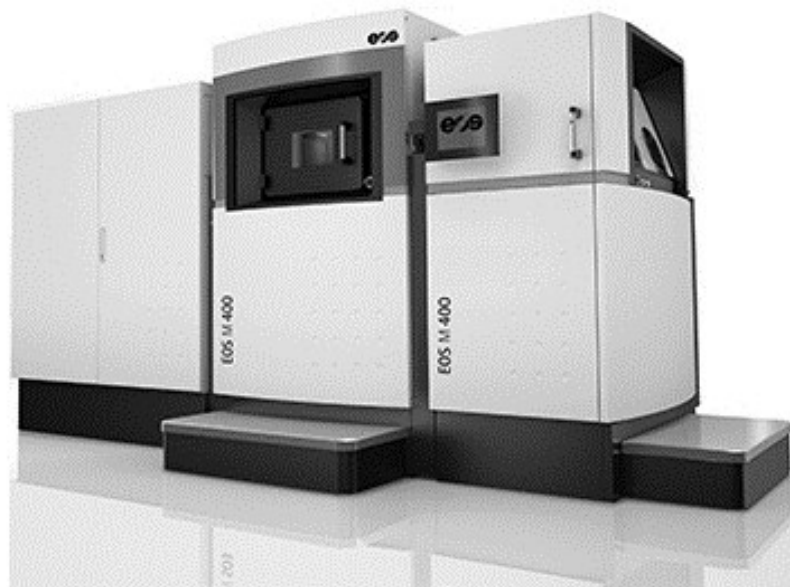
Kuva 13. Skannausstrategian yhdenlainen toteuttamistapa. [12]

Energialähteinä käytetään tällä hetkellä joko laseria tai elektronisuihkua, joista laser on huomattavasti yleisempi. Laserteknologia nojasi alkuun hiilidioksidilasereihin, mutta tätä nykyään käytetään Nd:YAG- ja kuitulasereita. Siirtyminen tiheämpi aaltopituiseen säteeseen tuo merkittävästi etua pulverin sulatustehoon, sillä mitä pienempi aallonpituus säteellä on, sitä paremmin sen energia absorboituu pulveriin lämpöenergiana. [12] Tavanomaisimmat lasertehot ovat 200 W ja 400 W, mutta markkinoilla on jo olemassa 1 kW tehoisia laserkoneita [31].

Lasersädettä ohjataan peilillä, jonka liikkeitä ohjataan yleensä kahden galvanometrin avulla. Toinen galvanometri ohjaa x-suuntaisen ja toinen y-suuntaisen liikkeen. [12]

Ohjaustarkkuudessa päästään $< 11 \mu\text{rad}$ ($\approx 0,00063^\circ$) toistotarkkuuteen. Lasersäteen kohdistusta hallitaan "F-theta"-nimisellä linssillä, jonka avulla säteen fokus asetetaan oikealla tavalla työtasoon. Säteen halkaisijaa voi myös säätää tilanteen mukaan 0,1-0,5 mm välillä. Säteen skannausnopeus on maksimissaan 7 m/s. [32] Rakennustilavuus voi olla parhaimmillaan 400 x 400 x 400 mm ja rakennuskammio täytetään inertillä kaasulla kuten typellä tai argonilla [31]. Laserin rakennusnopeus tai toisin sanoen sulatusnopeus on standardipulvereissa parhaimmillaan 20 cm³/h [21].

Metallisia lasersintrausjärjestelmiä toimittaa seuraavanlaiset valmistajat: Renishaw plc, EOS GmbH, SLM Solution GmbH, Concept Laser GmbH, Realizer GmbH, Phenix Systems ja Matsuura corp. Esimerkki lasersintrauskeskuksesta on nähtävissä kuvassa 14.



**Kuva 14. Lasersintrauskeskus, jossa kappaleen rakentuminen tapahtuu keskimmaisessä moduulissa.
(EOS GmbH)**

Elektronisuihkusulatusmenetelmässä energiasäde on nimensä mukaisesti korkeaenergistä elektronisuihkua, jonka virtausta ohjataan magneettikentän avulla. Elektronien törmätessä ainesmateriaalin atomeihin niiden liike-energia muuttuu lämpöenergiaksi aiheuttaen ainesmateriaalin sulamisen. Magneettikenttäohjaus mahdollistaa suihkun lähes välittömän ohjauksen toisin kuin lasermenetelmässä, jossa liikenopeutta rajoittaa peilin ja galvanometrien inertia. Nopean ohjattavuuden ja suuren säde-energiatuoton ansiosta menetelmällä on mahdollista kuumentaa koko pulveripetiä, jolloin kappaleen jäähtymistä on helpompi hallita. Elektronisuihkun takia sulatusprosessin on tapahduttava tyhjiössä, jotta suihkun energiaa ei absorboituisi kaasumolekyyleihin. [12]

EBM:n säteen tehoa on laseria helpompi ja halvempi kasvattaa ja tällä hetkellä markkinoilta löytyy yli 3 kW:n sädetehon tuottavia koneita. Näiden laitteiden säteen halkaisija voi olla pienimmillään 0,1 mm, ja sitä on lisäksi mahdollista jakaa useammaksi pienemmäksi säteeksi. [33] Suuren tehonsa ansiosta EBM:llä on saavutettavissa jopa 80 cm³/h rakennusnopeus [34]. Menetelmän haasteita on kappaleen pinnanlaadun ja tarkkuuden hallinnassa, sillä negatiiviset elektronit virittävät osuma-alueen atomeita myös negatiiviseen tilaan aiheuttaen energiasäteen hallitsematonta hajoamista. [12] Tällä hetkellä EBM:n laitteita valmistaa vain menetelmän kehitellyt ruotsalainen Arcam AB, jonka kone on nähtävissä kuvassa 15.



Kuva 15. Elektronisuihkusulatuskone. Kappaleen muodostaminen tehdään oikean puoleisessa moduulissa. (Arcam AB)

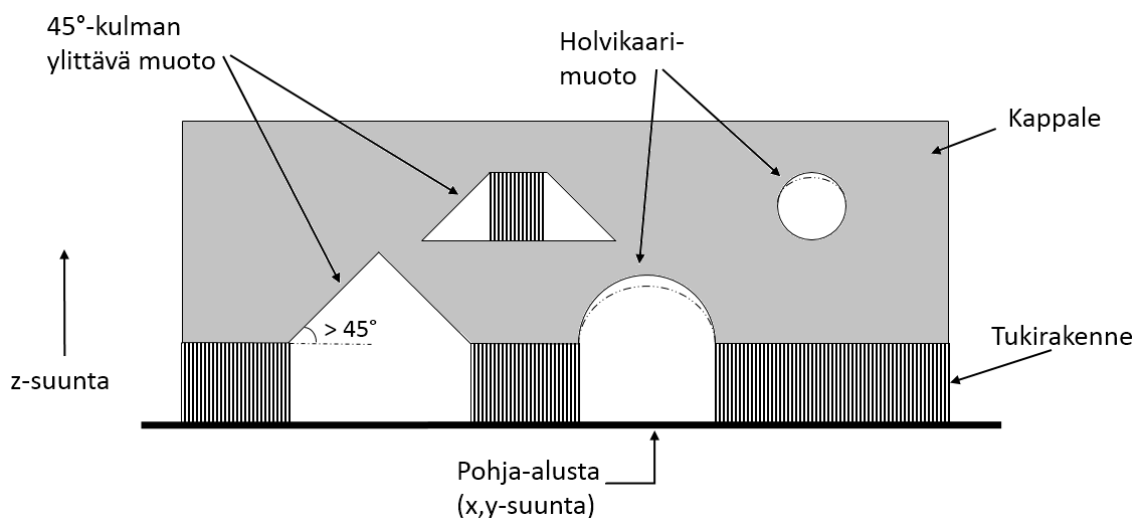
4.2.3 VAATIMUKSET KAPPALEEN SUUNNITTELULLE

Lisäävät menetelmät sallivat hyvin suuret vapaudet kappaleiden muotojen suunnittelulle. Jokaisessa menetelmässä on kuitenkin rajoitteensa ja oikeanlaisella suunnittelulla voidaan vähentää valmistusaikaa, -kustannuksia ja keventää tarvetta jälkiprosessointiin.

Metallisissa pulveripetisulatusmenetelmissä on tällä hetkellä käytettävä tukirakenteita (*support*) kappaleen kiinnittämiseksi valmistusaltaan pohja-alustaan sekä tarvittaessa muodon ”kasvupohjaksi”. Tukirakenteen avulla kyetään hallitsemaan paremmin metallin tilavuuden muutoksia lämpenemisen ja jäähtymisen yhteydessä. Muovisissa menetelmissä tämä ei tuota yhtä suurta ongelmaa, koska ainespulveri lämmitetään hyvin lähelle sen sulamispistettä, joten lämpöliike on pienempää prosessin aikana.

Tukirakenne muodostetaan kappaleen valmistuksen yhteydessä saman kerrosrakennuksen aikana ja se suunnitellaan kappaleeseen CAM-vaiheessa.

Tukirakenteen suunnittelun aikana tietokoneohjelma tekee automaattisesti ehdotuksen tukirakenteille, joka koskee alle 45°-kulman rakennustasoon (x,y-taso) nähden olevia pintoja (pystysuora pinta, z-suunta on 90°). Tätä pienemmissä astekulmissa tukirakenteen käyttämättömyys kasvattaa riskiä, jossa skannattu kerros saattaa kutistuessaan nousta ylös estäen lanan liikkeen ja näin pilata koko valmistusprosessin. Tämä on kuitenkin riippuvaista pulverimateriaalin ominaisuuksista. Tukirakenteiden valmistaminen kuluttaa kuitenkin pulverimateriaalia, vie aikaa ja se on poistettava jälkikäsittelyssä. Tästä syystä kappaleissa kannattaa suosia yli 45°-kulman muotoja rakennussuuntaan nähden. Holvikaari- ja reikämuodot ovat mahdollisuuksia poistaa tukirakenteita, mikäli yläosan pieni lommahdus alaspäin ei haittaa kappaleen toimintaa. [23] Tukirakenteen muodostuminen on nähtävissä kuvassa 16.



Kuva 16. Tukirakenteen muodostuminen.

Kappaleorientaatiota suunnitellessa kannattaa pitää mielessä, mitä kohtia joudutaan jälkikäsittämään. Lastuavaan työstöön joutuvat pinnat kannattaa olla tukimateriaalin puolella sekä heti hiottava ja kiillotettava pinta poissa tukimateriaalista. Yhtälailla kappaleen muotojen optimoinnissa on syytä huomioida jälkikäsittely: pitkälle viety optimoitu muoto voi olla erittäin vaikea hioa tai kiillottaa.

Kappaleissa on syytä välttää suuria massakeskittymiä, johtuen materiaali- ja koneaikakustannuksista. Jos niin sanottua umpiainesta tarvitaan, kannattaa osa jakaa pienempiin kokonaisuuksiin, joista monimutkaisimmat muodot toteutetaan pulveripetisulatusmenetelmällä ja isot blokit lastuavalla työstöllä. PBF-osa liitetään työstettyyn osaan inserttinä tai valmistetaan suoraan blokkiin kiinni. Jos PBF-

kappaleeseen kuitenkin on pakko jättää massakeskittymiä, voi kappaleen muodostumisnopeutta ja lämpöliikkeen hallintaa parantaa niin sanotusti ”pinta&sisusta”-rakenteella (*skin&core structure*). Rakenne perustuu energiasäteen skannaustapaan, jossa siivun reunamuodot skannataan joka kerroksella, mutta sisäosa vain joka kolmas kerros. Tällöin kappale rakentuu nopeammin ilman että pinnanlaatu kärsii. [35]

PBF-kappaleen pinnankarheus prosessin jäljiltä on suhteellisen karhea (yli Ra 10 µm), jonka takia pintaa on vielä jälkikäsiteltävä. Erilaisia käsittelymenetelmiä ovat hiekka- ja kuulapuhallus, kiillotus ja lastuavatyöstö. [36] Puhalluksen työstövaraksi kannattaa laittaa 0,05 mm ja kiillotukselle 0,03 mm, lastuamisessa työstövara voi vaihdella 0,1-0,5 mm välillä [37]. Niin sanotusti toleroidut mitat tai sovitemitat on syytä aina viimeistellä lastuavalla työstöllä eli joko sorvaamalla tai jyrsimällä [30].

4.3 PULVERIPETISULATUSMENETELMÄN TUOTANTOKUSTANNUKSET

Lisäävät menetelmät perustuvat suurimmilta osin tietokoneohjaukseen, joka sallii erittäin joustavan tavan tuottaa erilaisia tuotteita. Lisääviä menetelmiä ei ole tuotantomieleessä mielekäästä verrata valamiseen tai ainetta muovaaviin menetelmiin, sillä näissä menetelmissä nopea tuotevariointi on hankalaa ja eritoten kallista, ja ne soveltuvatkin tästä syystä suursarjatuotantoon. Sen sijaan tietokoneohjattu lastuavatyöstö monikäyttöisine työkaluinen on erittäin joustava tapa tehdä vaihtelevia tuotteita, ja siksi lisääviä menetelmiä voidaankin verrata juuri tällaisiin sorvaus- ja jyrsintäkoneisiin. Esimerkiksi kappaleen pinnanlaatuun voidaan vaikuttaa pelkästään koneen ohjausparametreja muuttamalla: lastuavassa työstössä syötöllä ja lisäävissä menetelmissä kerrospaksuudella.

Molemmissa menetelmissä kappaleen valmistuskustannuksiin vaikuttaa materiaalin hinnan lisäksi koneajan hinta. Lisäksi kappaleen laatuominaisuudet ovat suoraan verrannollisia koneen teknisen laadun kanssa. Muissa edellisessä kappaleessa mainituissa valmistustavoissa kappaleen hinta määräytyy ennemminkin kappalemäärän suhteesta kokonaiskustannuksiin. Tästä syystä termi ”lisäävä koneistus” ja ”poistava koneistus” ovat varteen otettavia termejä verratessa lisääviä menetelmiä tietokoneohjattuun lastuavaan työstöön. Tässä osiossa käytetään tästä eteenpäin termejä ”lastuavakoneistus”, ”laserkoneistus” ja ”elektronikoneistus”, joista ensimmäinen koskee sorvausta, jyrsintää ja porausta, toinen lasersintrausmenetelmää ja kolmas elektronisuihkusulatusmenetelmää. Laser- ja elektronikoneistukselle käytetään yhteistä termiä PBF-koneistus.

On kuitenkin syytä muistaa, että lastuavalla koneistuksella on mahdollista saavuttaa huomattavasti hienompia pinnankarheuksia sekä yleistoleransseja tarkempia arvoja kuin lisäävällä koneistuksella. Toisaalta, lisäävällä koneistuksella on mahdollista tehdä muotoja, joita lastuavalla työllä on vaikeaa tai jopa mahdotonta valmistaa. Jotta menetelmistä voisi tehdä joitain vertailevia kustannusarvioita, PBF-koneistusta verrataan seuraavissa laskuissa lastuavan työstön rouhintaan. Samoin tuotteen ajatellaan olevan tehtävissä kummalla menetelmällä tahansa. Seuraavat laskut eivät ota siis kantaa kappaleen viimeistelyvaiheisiin kuuluvia kustannuksia.

Suurin osa käytettävistä yhtälöistä on luotu tätä vertailua varten, ja koska kyseessä on menetelmien vertailu numeerisesti, kutsutaan näitä yhtälöitä RENI-yhtälöiksi (*Referencing Evaluation by Numerical Inspection*).

4.3.1 MATERIAALIKUSTANNUKSET

Lastuavassa koneistuksessa käytettävä materiaali on yleensä valssattua tai taottua levyä, tankoa tai putkea. Yleisesti koneeseen laitettavaa kappaletta kutsutaan ahioksi, josta sitten lastu kerrallaan poistetaan metallia haluttua muotoa kohti. PBF-koneistuksessa ainesmateriaali ladataan koneeseen ja sitä käytetään sen verran kuin tarve on. Altaaseen levitetty ja sulattamatta jäänyt pulveri on mahdollista käyttää uudelleen. Näistä syistä on mielekästä tarkkailla materiaalikustannuksia itse tuotteen muodostamiseksi.

Laser- ja elektronikoneistetun tuotteen materiaallinen kilohinta on yhtä paljon kuin materiaalin ostohinta. Kuitenkin tukirakenteisiin menevä materiaali on myös laskettava mukaan kustannuksiin. Laskennallisin termein yhtälö on seuraava:

$$C_{mat,PBF} = P_{pulveri} + P_{tuki} \quad (4)$$

jossa $C_{mat,PBF}$ = Tuotteen materiaalikustannukset PBF-koneistuksella [€/kg]

$P_{pulveri}$ = Pulverin hinta [€/kg]

P_{tuki} = Pulverihinta tukimateriaalille [€/kg]

Lastuavassa koneistuksessa tuotteen materiaalikustannukset ovat samat kuin aihion materiaalikustannukset. Tämä tarkoittaa, että tuotteen kilohinta on enemmän kuin aihion kilollinen hinta. Laskennallisesti lastuavasti koneistetun tuotteen kilohinta on käsitettävissä seuraavasti:

$$C_{mat,lastu} = \frac{1}{1-a} * P_{aihio} \quad (5)$$

jossa $C_{mat,lastu}$ = Tuotteen materiaalikustannukset lastuavalla koneistuksella [€/kg]

P_{aihio} = Aihion hinta [€/kg]

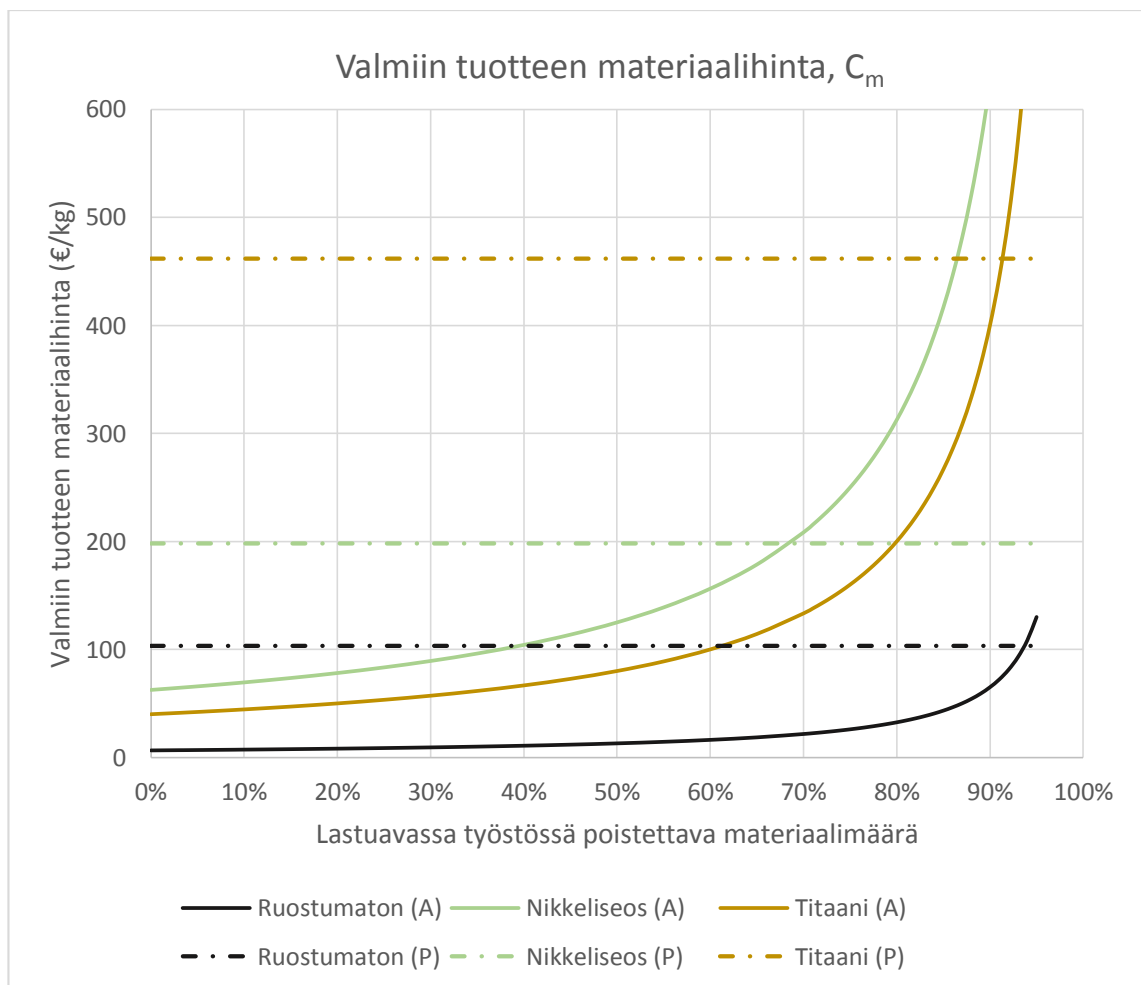
a = Poistettavan materiaalin määrä suhteessa aihioon

Kaavasta (5) on nähtävissä, että mitä vähemmän valmiissa kappaleessa on materiaalia, sitä suuremmat ovat valmiin kappaleen materiaalikustannukset. Mekaanisiin tiivistimiin soveltuvien pulverien ja ahiomateriaalien suuntaa antavat hinnat on nähtävissä taulukosta 3. Luvut perustuvat konevalmistajilta ja materiaalityöntekijöiltä saatuihin tietoihin [23] [38].

Taulukko 3. Pulveri- ja ahiometallien hinnat.

Materiaali	Pulveri [€/kg]	Aihio [€/kg]
Ruostumaton	88-100	3-10
Nikkeliseos	150-210	55-70
Titaani(seos)	300-540	30-50

Tulevissa laskuissa käytetään taulukon 3 kustannuksista ainesmateriaalien keskimääräistä hintaa. Näiden materiaalikustannusten ja kaavojen (4) ja (5) tietojen pohjalta voidaan luoda kaavio 1, jossa (A) tarkoittaa ahiollista ja (P) pulverillista hintaa. Tukirakenteen tekoon, P_{tuki} , oletetaan käytettävän kymmenesosa (10%) kulutetusta pulverista. Kyseisessä kaaviosta nähdään, että valmiin kappaleen materiaalihinta kehittyy eri tavoin lisäävässä koneistuksessa kuin poistavassa: lisäävässä kilohinta pysyy vakiona, kun taas poistavassa koneistuksessa valmiskilohinta nousee eksponentiaalisesti sen mukaan kuinka paljon materiaalia joudutaan poistamaan.

**Kaavio 1. Tuotteen materiaalihinnan kehitys.**

Kaaviossa 1 nähtävien lastuavan ja PBF-koneistuksen materiaalikustannuksien leikkauskohdat ovat laskettavissa olevia arvoja. Tällöin materiaalihintakulut yhdistetään yhtäsuuruuslausekkeeksi ja etsitään tämän yhtälön nollakohta poistettavan materiaalmäärän suhteen. Menetelmällä saadaan seuraava yhtälö:

$$a_{mat} = 1 - \frac{P_{aihio}}{P_{pulveri} + P_{tuki}} \quad (6)$$

jossa a_{mat} = Materiaalihintojen leikkauskohta poistettavan materiaalmäärän suhteen

Yhtälön (6) mukaisesti aihoiden ja pulvereiden materiaaliset erot ovat nähtävissä taulukosta 4. Kyseisestä taulukosta nähdään, että taulukon 3 mukaisten tietojen ja 10 % tukimateriaalitarpeen mukaan materiaalikustannukset ovat lisäävissä pienempiä, kun aihioista joudutaan poistamaan ruostumattoman teräksen tapauksessa yli 94 %, nikkeliseoksissa yli 62 % ja titaanissa yli 88 %. Kuitenkin on pidettävä mielessä, että näihin laskuihin ei ole lisätty romumetallista takaisin palautuvaa hintaa.

Taulukko 4. Menetelmien leikkauskohta materiaalikustannuksissa.

<i>Materiaali</i>	<i>Poistettava määrä, a_{mat}</i>
<i>Ruostumaton</i>	94 %
<i>Nikkeliseos</i>	68 %
<i>Titaani</i>	91 %

4.3.2 LAITEKUSTANNUKSET

Lastuavan työstön koneissa ja niin ikään lisäävissä menetelmissä laitekustannuksien suurin tekijä on hankintahinta, joka koneen pitää tietyllä aikavälillä maksaa itsensä takaisin. Muita merkittäviä kustannuksia ovat myös työvoima- ja huoltokustannukset. Lastuavassa koneistuksessa kustannuksia kertyy myös työkaluista ja ennen kaikkea teräpaloista. Taulukosta 5 nähdään 5-akselisen koneistuskeskuksen sekä laser- ja elektronikoneistuksen hintaan vaikuttavia perusarvoja. Lastuavan koneistuksen arvot perustuvat Esko Niemen opetusmateriaaliin [39] sekä haastatteluihin [10]. Laserkoneistuksen arvot nojaavat Ronald Bergerin tekemiin tutkimuksiin [21] ja elektronikoneistuksen arvot ovat kopioitu lasermenetelmästä pois lukien koneen hinta, joka perustuu Steven Rengersin julkaisemaan tietoon [40].

Taulukko 5. Koneistukseen vaikuttavat hinnat.

	<i>Lastuava</i>	<i>Laser</i>	<i>Elektroni</i>	<i>Yksikkö</i>
<i>Laitehankinta</i>	350000	500000	1000000	€
<i>Takaisinmaksuaika</i>	8	8	8	a
<i>Vuosityö</i>	1500	1500	1500	h/a
<i>Työvuorot</i>	2	1	1	kpl
<i>Koneenkäyntiaika</i>	3000	7270,8	7270,8	h/a
<i>Korkoprosentti</i>	3 %	3 %	3 %	
<i>Vuosihuolto</i>	10000	24000	24000	€/a
<i>Työnjohtokulut</i>	40000	40000	40000	€/a
<i>Työntekijäkulut</i>	25	25	25	€/h
<i>Energia</i>	0,7	0,7	0,7	€/h
<i>ATK</i>	1	1	1	€/h
<i>Työkalut</i>	10-20	-	-	€/h
<i>Kulutustavara/kaasut</i>	-	3000	3000	€/a

Laitehankinnaltaan kaikki kyseiset koneet ovat kalliita, mutta tätä kompensoidaan pitkällä käyttöiällä. Tässä tapauksessa takaisinmaksuaika jaetaan oletettavalle käyttöiälle, joskin yleisesti ottaen takaisinmaksuaika on lyhempi kuin koneen todellinen käyttöikä. Työntekijän vuosittainen tuntityömäärä on 1500 h/a, mutta vuoroja lisäämällä voidaan nostaa koneenkäyntiaikaa suuremmaksi. Lisäävän koneistuksen käyntiaikaan ei niinkään vaikuta ihmisen työtunnit, sillä valmistusprosessin automatisointi on niin laaja, että koneilla on jopa suotavaa ajaa vuorokauden ympäri. Laskennallisesti koneen käyntiaika voidaan pitää 83 % koko vuoden tuntimäärästä, mikä tarkoittaa seisokkiaikana n. 9 viikkoa. Koneille on myös syytä laskea vuotuinen korkoprosentti, sillä kone on investointi siinä missä muutkin investoinnit.

Vuosihuoltojen avulla taataan koneiden käyntivarmuus. Huoltojen hinta toki vaihtelee käyntiajoista riippuen, mutta taulukon 5 arvot ovat suuntaa antavia. Työnjohto- ja työntekijäkulut voidaan mieltää jokaiselle menetelmälle samaksi. PBF-koneiden energiakulutus on 8 kW luokkaa, joka on myös käypä arvo lastuavan koneistuksen energiakulutukselle. Tietokoneohjelmien hinnat oletetaan myös samoiksi. Lastuavassa koneistuksessa kustannuksiin vaikuttaa lisäksi työkalukustannukset ja niistä erityisesti teräpalojen kustannukset. Yhdellä teräpalalla voidaan keskimäärin lastuta 15–20 min, jonka jälkeen tämä pala on vaihdettava. Teräpalojen kuluminen kasvaa haastavissa materiaaleissa kuten nikkeli- ja titaaniseoksissa. Lisäävässä koneistuksessa kulutustavaraa tulee mm. kuluvista alustalevyistä, joista kappaleen muodostaminen aloitetaan.

Taulukon 5 pohjalta on laskettavissa tuntikohtaiset koneistus- ja asetushinnat (P_{ajo} ja P_{asetus}) yksittäiselle koneelle. Laskelmat ja niiden tulokset on nähtävissä taulukosta 6.

Taulukko 6. Koneistuksen tuntihintalaskelmat.

€/h	<i>Lastuava</i>	<i>asetus</i>	<i>Laser</i>	<i>asetus</i>	<i>Elektroni</i>	<i>asetus</i>
<i>Työn tuntihinta</i>	25,00	25,00	1,25	25,00	1,25	25,00
<i>Poisto</i>	14,58	20,83	8,60	8,60	17,19	17,19
<i>Korko</i>	3,50	3,50	2,06	2,06	4,13	4,13
<i>Energia</i>	0,70	0,00	0,70	0,00	0,70	0,00
<i>Huolto</i>	3,33	0,00	3,30	0,00	3,30	0,00
<i>Työnjohto</i>	0,67	0,00	0,28	0,00	0,28	0,00
<i>Ohjelmointi</i>	2,67	0,00	1,10	0,00	1,10	0,00
<i>ATK</i>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>Työkalut/kulutus</i>	10-20	0,00	0,41	0,00	0,41	0,00
<i>Koneistuksen hinta, P_{ajo}</i>	61,45-71,45		18,70		29,36	
<i>Asetusajan hinta, P_{asetus}</i>	44,08		36,66		47,32	

Työn tuntihinta on sama kuin koneistajan palkkakustannus. Lastuavassa työstössä koneistajan on aina oltava koneen lähellä läsnä vaihtamassa teräpaloja, valmistelemassa seuraavaa aihiota/erää sekä olla valmiina vikatilojen varalta, kuten teränpalan hajoamiseen. Lisäävässä koneistuksessa jatkuvaa päivystystä ei tarvita, joten työntekijän aikaa käytetään tässä tapauksessa vain 5 % hänen kokonaistyöajastaan. Asetusaikoina työntekijä on koko ajan työllistettynä jokaisessa tapauksessa. Lisävään koneistuksen pieni poistomäärä ja korkotuotto tuntia kohden johtuvat suuresta koneen käyntiajasta. Työnjohdolta käytetään niin ikään 5 % vuotuisista työnjohtokuluista. Samoista kuluista lasketaan niin ikään 20 % ohjelmoinnin tarpeisiin. Kaiken kaikkiaan lisäävän koneistuksen tuntihinnat ovat lastuavaa halvempia johtuen vuotuisten kulujen jakautumisesta suuremmalle ajotuntimäärälle.

4.3.3 AJANKÄYTTÖVERTAILU

PBF-koneistuksessa tuotteen valmistusaikaan vaikuttaa materiaalin sulamisnopeus ja kappaleen z-suuntainen korkeus. Sulamisnopeuteen vaikuttaa materiaalin kyky absorboida säteen energiaa ja itse säteen teho. Tuotteen korkeuden merkitys tulee esiin kerrospaksuudesta ja lanausnopeudesta: mitä korkeampi ja mitä useampia kerroksia kappaleeseen tulee, sitä enemmän menee aikaa lanan liikuttamiseen. Tuotteen valmistusajan voi laskea seuraavalla kaavalla:

$$t_{PBF} = \frac{V_{kok}}{Q_{sula}} + \frac{h_{kok}}{h_{kerros}} * t_{lana} \quad (7)$$

jossa t_{PBF} = Tuotteen valmistusaika PBF-koneistuksessa [min]

V_{kok} = Valmistettava kokonaistilavuus sisältäen tukirakenteen [cm³]

Q_{sula} = Pulverin sulamisnopeus [cm³/min]

h_{kok} = Valmistettava kokonaiskorkeus, sisältää myös tukirakenteen [mm]

h_{kerros} = Käytettävä kerrospaksuus [mm]

t_{lana} = Kerroksen lanaamiseen kuluva aika [min]

Standardimateriaaleille laserin sulatusnopeus vaihtelee 5-20 cm³/h välillä ja elektronisuihkun maksimi on jopa 80 cm³/h. Valikoitavat kerrospaksuudet ovat molemmilla 0,02-0,1 mm ja laserkoneistuksessa lanausaika on 10-15s, jota pidetään näissä laskuissa samana elektronisuihkukoneistuksessa. Yhtälöstä (7) on johdettavissa tuotteen ominaismuodostumisaika:

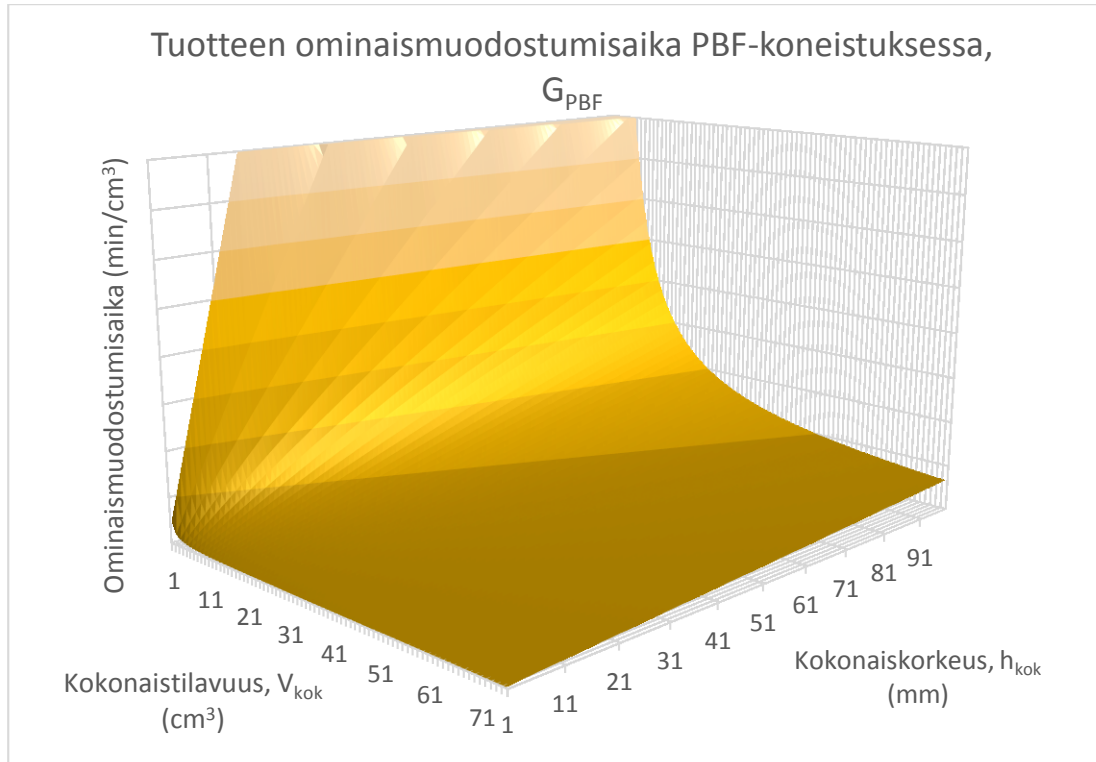
$$G_{PBF} = \frac{t_{AM}}{V_{kok}} \quad (8)$$

jossa G_{PBF} = Tuotteen ominaismuodostumisaika PBF-koneistuksella [min/cm³]

Yhdistämällä kaava (7) kaavaan (8) avautuu tämä yhtälö muotoon:

$$G_{PBF} = \frac{1}{Q_{sula}} + \frac{h_{kok}}{h_{kerros}} * \frac{t_{lana}}{V_{kok}} \quad (9)$$

Kaavan (9) perustella voidaan tehdä kaavio 2, josta nähdään tilavuusyksikköön käytettävän ajan suhde kokonaistilavuuteen ja kokonaiskorkeuteen verrattuna.



Kaavio 2. Tuotteen ominaismuodostumisaika lisäävässä koneistuksessa.

Kaaviosta 2 nähdään, että tuotteen ominaismuodostumisaika kasvaa, kun kokonaiskorkeuden kasvusta johtuva kerrosten määrä kasvaa suhteessa kokonaistilavuuteen. Yksinkertaistetusti tämä tarkoittaa sitä, että pitkä tuote muodostuu vaakatasoisena nopeammin kuin pystysuunnassa.

Lastuavasti koneistaessa tuotteen ominaismuodostumisaikaan vaikuttaa lastuvirran määrä, johon vaikuttavat lastuamisnopeus, lastuamissyvyys sekä syötön määrä. Yksinkertaisimmillaan lastuvirran määrää voidaan laskea sorvausmenetelmällä [41]:

$$Q_{\text{lastu}} = v_c * a_p * f_n \quad (10)$$

jossa Q_{lastu} = Lastuvirta [cm^3/min]

v_c = Lastuamisnopeus [m/min]

a_p = Lastuamissyvyys [mm]

f_n = Kierrossyöttö [$\text{mm}/\text{kierr.}$]

Lastuvirran voi mieltää niin sanotusti työstön ”syöntinopeudeksi”. Lastuamisnopeus, -syvyys ja kierrossyöttö vaihtelevat teräpalan ominaisuuksien ja työstettävän materiaalin mukaan. Suhteuttamalla lastuvirta poistettavan materiaalin määrään voidaan tuotteen valmistusaika saada yhtälöstä:

$$t_{lastu} = \frac{a * V_{aihio}}{Q_{lastu}} \quad (11)$$

jossa t_{lastu} = Tuotteen valmistusaika lastuavalla koneistuksella [min]

a = Poistettavan materiaalin määrä suhteessa aihioon

V_{aihio} = Aihion tilavuus [cm³]

Lastuavasta työstöstä voidaan niin ikään tehdä tuotteen ominaismuodostumisaika:

$$G_{lastu} = \frac{t_{lastu}}{V_{tuote,lastu}} \quad (12)$$

jossa G_{lastu} = Tuotteen ominaismuodostumisaika lastuavalla koneistuksella [min/cm³]

$V_{tuote,lastu}$ = Lastuavalla työstöllä tehdyn tuotteen tilavuus [cm³]

Koska tuotteen tilavuus on kuitenkin prosentuaalinen osuus aihion tilavuudesta, voidaan yhtälö (12) avata muotoon:

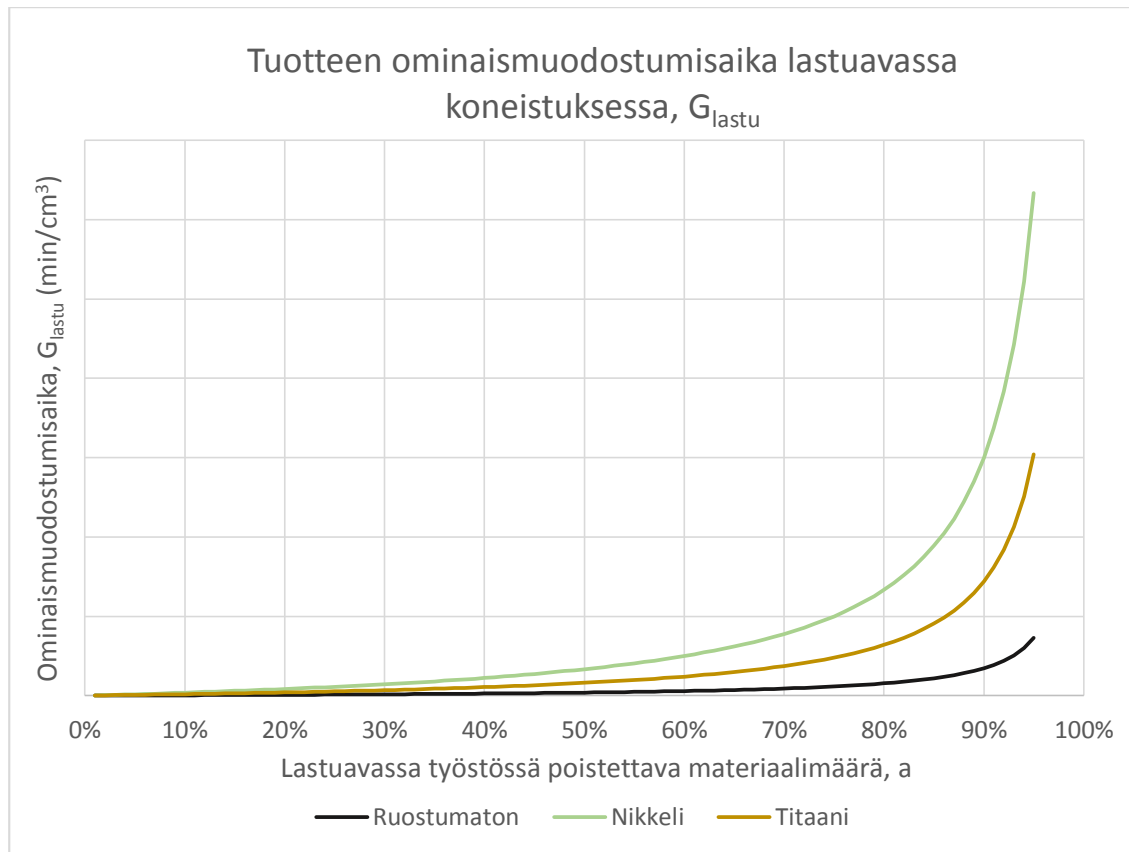
$$G_{lastu} = \frac{a}{1-a} * \frac{1}{Q_{lastu}} \quad (13)$$

Lastuamisarvot vaihtelet käytettävän teräpalamateriaalin mukaan, ja jokaisella valmistajalla on omia paloja lastuttaville materiaaleille. Laskelmia varten käytetään Sandvik Coromantin teräpala-arvoja, jotka ovat nähtävissä taulukosta 7.

Taulukko 7. Lastuavan työstön arvoja eri materiaaleille. [42]

	<i>Ruostumaton (duplex)</i>	<i>Nikkeliseos</i>	<i>Titaani</i>	
<i>Teräaine</i>	GC2015	GC1115	GC1115	
<i>Lastuamissyvyys, a_p</i>	0,6	0,5	0,5	mm
<i>Kierrossyöttö, f_n</i>	0,6	0,5	0,5	mm/kierr.
<i>Lastuamisnopeus v_c</i>	145	24	50	m/min
<i>Lastuvirta, Q_{lastu}</i>	52,2	6	12,5	cm ³ /min

Taulukon 7 tietojen perusteella voidaan kaavan (13) sisältämä informaatio näyttää kaaviossa 3. Kyseisestä kaaviosta nähdään, että lastuavassa koneistuksessa kappaleen muodostuminen vie enemmän aikaa tilavuusyksikköä kohden poistettavan ainesmateriaalin kasvun myötä. Käytettävän ajan kasvun jyrkkyyteen vaikuttaa merkittävästi teräpalan lastuamisnopeuskyky.



Kaavio 3. Tuotteen ominaismuodostumisaika lastuavassa koneistuksessa.

Tuotteen ominaismuodostumisaikaan vaikuttaa myös asetusaja, joka tarkoittaa koneen asetuksien, kuten työkalujen tai ajoparametrien säätämiseen ja asettamiseen kuluvaa aikaa. Asetusajan kesto vaihtelee työntekijän kokemuksen, tuotteen uutuuden sekä mahdollisesti myös työkalutarpeen mukaan. Lisäävässä koneistuksessa asetusajan voi pitää vakiona melko lyhyenä, 30 minuuttia. Aikaa kuluu käytännössä koneen käynnistykseen kuluvaan aikaan ja valmistusohjelman sisäänajo. Lastuavassa työstössä asetusten tekoon voi kulua 0,5-8 h riippuen siitä, että onko kappaletta tehty aiemmin ja miten paljon erilaisia työkaluja kappale vaatii. Lisäämällä asetusaja ominaismuodostumisaikaan saadaan yhtälö:

$$G_{kok} = G + A \quad (14)$$

jossa G_{kok} = Kokonaisominaismuodostumisaika [min/cm³]

G = Tuotteen ominaismuodostumisaika [min/cm³]

A = Asetusajan lisäys ominaismuodostumisaikaan [min/cm³]

Asetusajan lisäys on asetusaja jaettuna tuotteen tilavuudella, joten asetusajan lisäys on avattavissa seuraavasti:

$$A = \frac{t_{asetus}}{V_{tuote}} \quad (15)$$

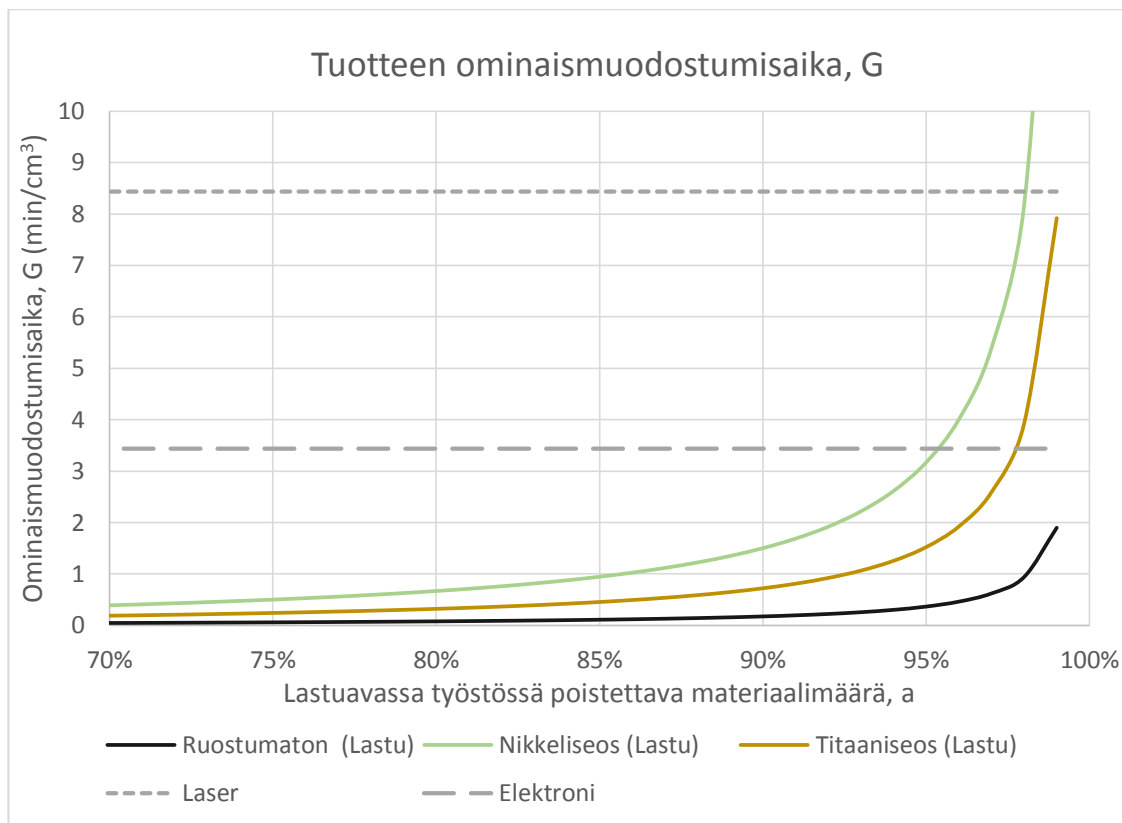
jossa t_{asetus} = Menetelmäkohtainen asetus aika [min]

V_{tuote} = Menetelmäkohtaisen tuotteen tilavuus [cm³]

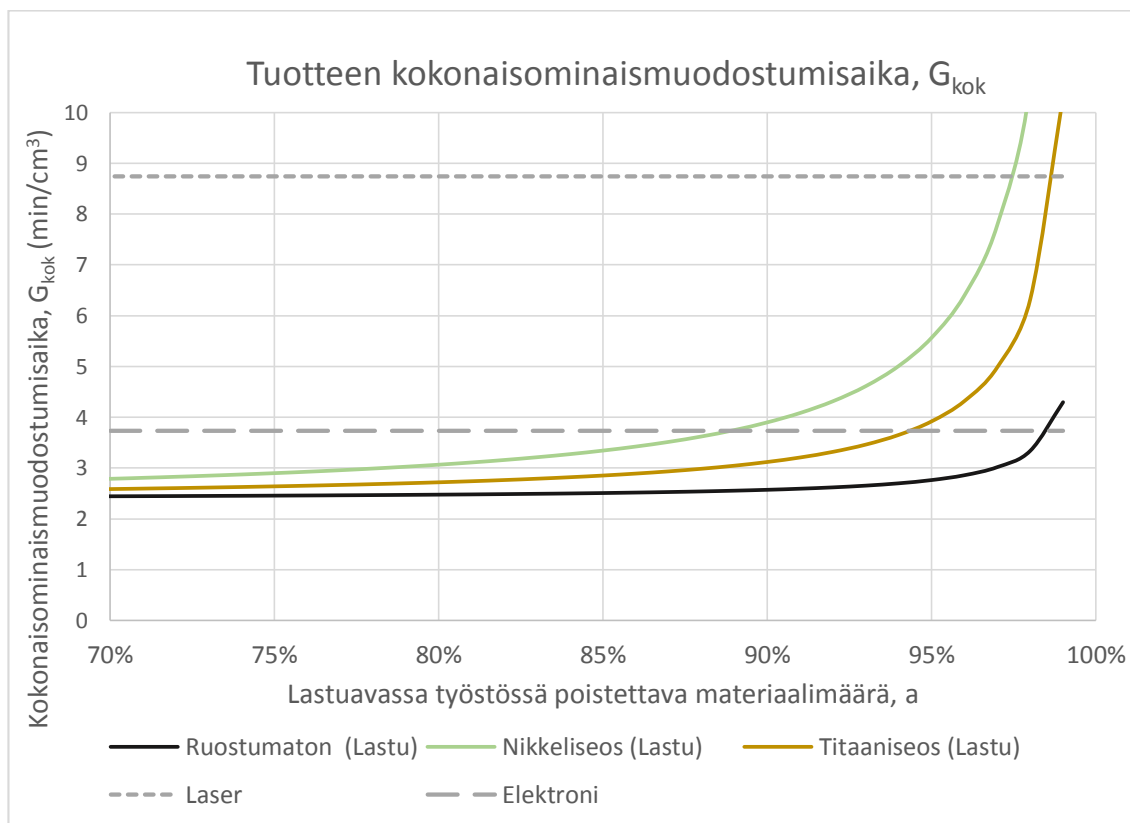
Verratessa menetelmiä keskenään on laskuja varten tehtävä joitain valintoja tuotteen ja laskettavien parametrien suhteen. Seuraavissa laskelmissa käytetään taulukon 8 mukaisia arvoja. Taulukon mukaisine lähtöarvoineen sekä edellä esitettyjen (9) ja (14) yhtälöiden avulla tuotteen ominaismuodostumisajat ovat nähtävissä kaaviosta 4. Lisäämällä edelliseen asetusajan vaikutus saadaan kokonaisominaismuodostumisajat, jotka ovat nähtävissä kaaviosta 5. Johtuen lastuvavan työstön huomattavasta nopeudesta, kaavioiden tarkastelut koskevat yli 70% aihioista poistettavaa määrää.

Taulukko 8. Käytettävät arvot aikavertailua varten. Rst = Ruostumanton, Ni = nikkeliseos, Ti = titaaniseos.

	<i>Lastuavakoneistus</i>			<i>Laserkoneistus</i>			<i>Elektronikoneistus</i>		
	Rst	Ni	Ti	Rst	Ni	Ti	Rst.	Ni	Ti
<i>Tuotteen tilavuus [cm³]</i>		100			100			100	
<i>Tuotteen korkeus [mm]</i>		50			50			50	
<i>Tukirakenteen lisäkorkeus [mm]</i>		-			1,5			1,5	
<i>Tukimateriaalin määrä</i>		-			10 %			10 %	
<i>Lastuvirta/ sulatusteho [cm³/min]</i>	52,2	6,0	12,5		0,17			1,0	
<i>Asetusaika [h]</i>		4,0			0,5			0,5	
<i>Kerrospaksuus [μm]</i>		-			40			40	
<i>Lanausaika [s]</i>		-			12,5			12,5	



Kaavio 4. Tuotteen ominaismuodostumisaajat eri menetelmillä.



Kaavio 5 Tuotteen ominaismuodostumisaajat eri menetelmillä.

Kaavioista 4 ja 5 voidaan huomata, että vaikka työstettävissä materiaaleissa on eroja lastuamisvirtoihin nähden, PBF-koneistus on prosessina lähes yhtä nopeaa vasta 90 % ylittävissä aihion poistoissa. Elektronikoneistus on laserkoneistusta nopeampaa johtuen suuremmasta sulatustehosta. Asetusajan lisääminen ei juurikaan kasvattanut laser- tai elektronikoneistuksen muodostumisaikaa, mutta tällöinkään ne eivät ole merkittävästi lastuavaa koneistusta nopeampia.

Ominaismuodostumisaikojen leikkauskohdat ovat laskettavissa olevia arvoja, jolloin koneistusajat yhdistetään yhtäsuuruuslausekkeeksi ja etsitään tämän yhtälön nollakohta poistettavan materiaalmäärän suhteen. Menetelmällä saadaan seuraavat yhtälöt:

$$a_G = \frac{G_{PBF} * Q_{lastu}}{1 + G_{PBF} * Q_{lastu}} \quad (16)$$

$$a_{G,kok} = \frac{(G_{PBF} - A_{lastu}) * Q_{lastu}}{1 + (G_{PBF} - A_{lastu}) * Q_{lastu}} \quad (17)$$

jossa a_G = Ominaismuodostumisaikojen leikkauskohdat poistettavan materiaalin suhteen

$a_{G,kok}$ = Kokonaisominaismuodostumisaikojen leikkauskohdat poistettavan materiaalin suhteen

Ominaismuodostumisaikojen leikkauskohdat on nähtävissä taulukosta 9.

Taulukko 9. Koneistusmenetelmien leikkauskohta koneistusnopeuksissa.

	a_G		$a_{G,kok}$	
	Laser	Elektroni	Laser	Elektroni
<i>Ruostumaton</i>	99,8 %	99 %	99,7 %	99 %
<i>Nikkeliseos</i>	98 %	95 %	97 %	89 %
<i>Titaaniseos</i>	99 %	98 %	99 %	94 %

Asetusaika itsessään on melko suhteellinen käsite. Mikäli lastuavalla koneistuksella tehdään useampia tuotteita samalla koneistuskerralla, jakautuu asetusaika jokaiselle valmistettavalle kappaleelle. Näin on myös lisäävän koneistuksen tapauksessa, joskin etu ei ole merkittävä lyhyen asetusajan takia. Tilanne on huomioitavissa edellä esitetyissä laskuissa käyttämällä niissä kokonais- tai kappaletilavuudessa erän

totaalitulavuutta. Lisäksi suuremmassa tuotteessa asetusajan lisäyksen lukuarvo vähenee, johtuen asetusajan jakautumisesta isommalle tilavuudelle.

Lastuavassa koneistuksessa on lisäksi otettava huomioon työn keskeytyminen työvuoron loputtua. Vaikka kone olisikin toiminnassa kahdessa työvuorossa, tuote ei saata edistyä kuin yhden työvuoron aikana. Tällöin lastuavan koneistuksen kappaleaikaan on lisättävä odotusaika, joka on yön yli kestäessään suurimmillaan 16 h. Tämä kasvattaa huomattavasti tuotteen kokonaisominaismuodostumisaikaa.

4.3.4 KOKONAISKUSTANNUSVERTAILU

Materiaalikustannukset ja koneistuskustannukset ovat keskeisessä roolissa tuotteen kustannuksissa, joten tätä yhdistelmää kutsutaan tuotekustannukseksi:

$$C_{tuote} = C_{mat} + C_{kone} \quad (18)$$

jossa C_{tuote} = Tuotekustannus [€/kg]

C_{mat} = Tuotteen materiaalikustannukset [€/kg]

C_{kone} = Tuotteen koneistuskustannukset [€/kg]

Kokonaiskustannuksia varten on otettava huomioon myös asetusajasta aiheutuvat kustannukset:

$$C_{kok} = C_{tuote} + C_{asetus} \quad (19)$$

jossa C_{kok} = Tuotteen kokonaiskustannus [€/kg]

C_{asetus} = Tuotteen asetuskustannukset [€/kg]

Materiaalikustannuksien kehitys on selvitetty aiemmin 5.1 osiossa. Kappaleen koneistuskustannukset sen sijaan muodostuvat koneistusajasta ja sen laskennallisesta hinnasta:

$$C_{kone} = \frac{P_{ajo} * G_{tuote}}{\rho_{mat}} \quad (20)$$

jossa P_{ajo} = Koneistuksen hinta [€/min]

G_{tuote} = Tuotteen ominaismuodostumisaika [min/cm³]

ρ_{mat} = Käytettävän materiaalin tiheys [kg/cm³]

Koneistushinnat ovat nähtävissä taulukosta 6, jotka on tosin vielä käännettävä minuuttimuotoon. Muodostumisyksikkö saadaan menetelmistä riippuen kaavojen (9) ja (13) mukaan. Kappaleen asennuskustannukset selviävät kaavalla:

$$C_{asetus} = \frac{P_{asetus} * t_{asetus}}{V_{tuote} * \rho_{mat}} \quad (21)$$

jossa P_{asetus} = Asetusajan hinta [€/min]

t_{asetus} = Asetusaika [min]

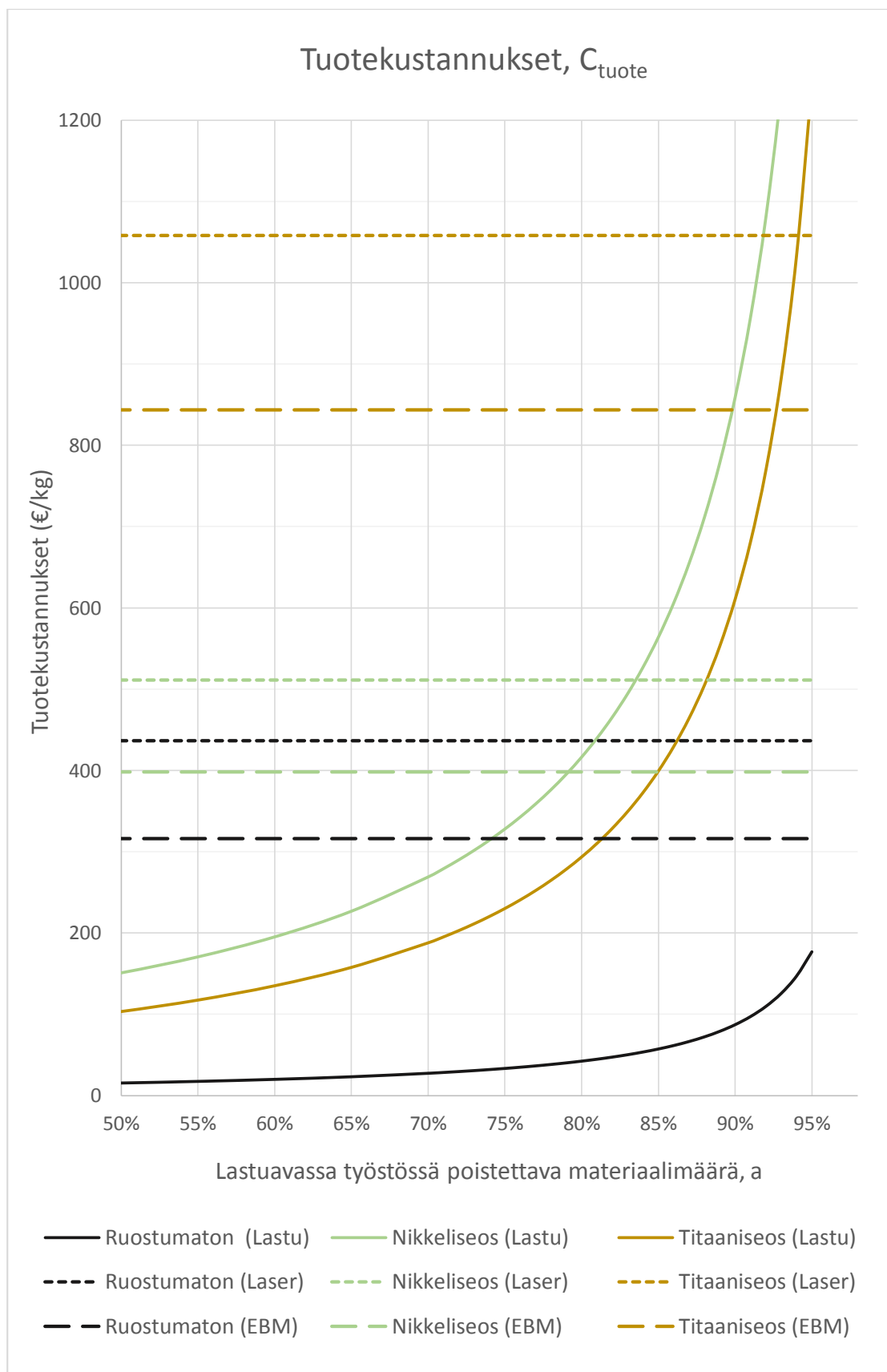
V_{tuote} = Tuotteen tilavuus [cm³]

ρ_{mat} = Käytettävän materiaalin tiheys [kg/cm³]

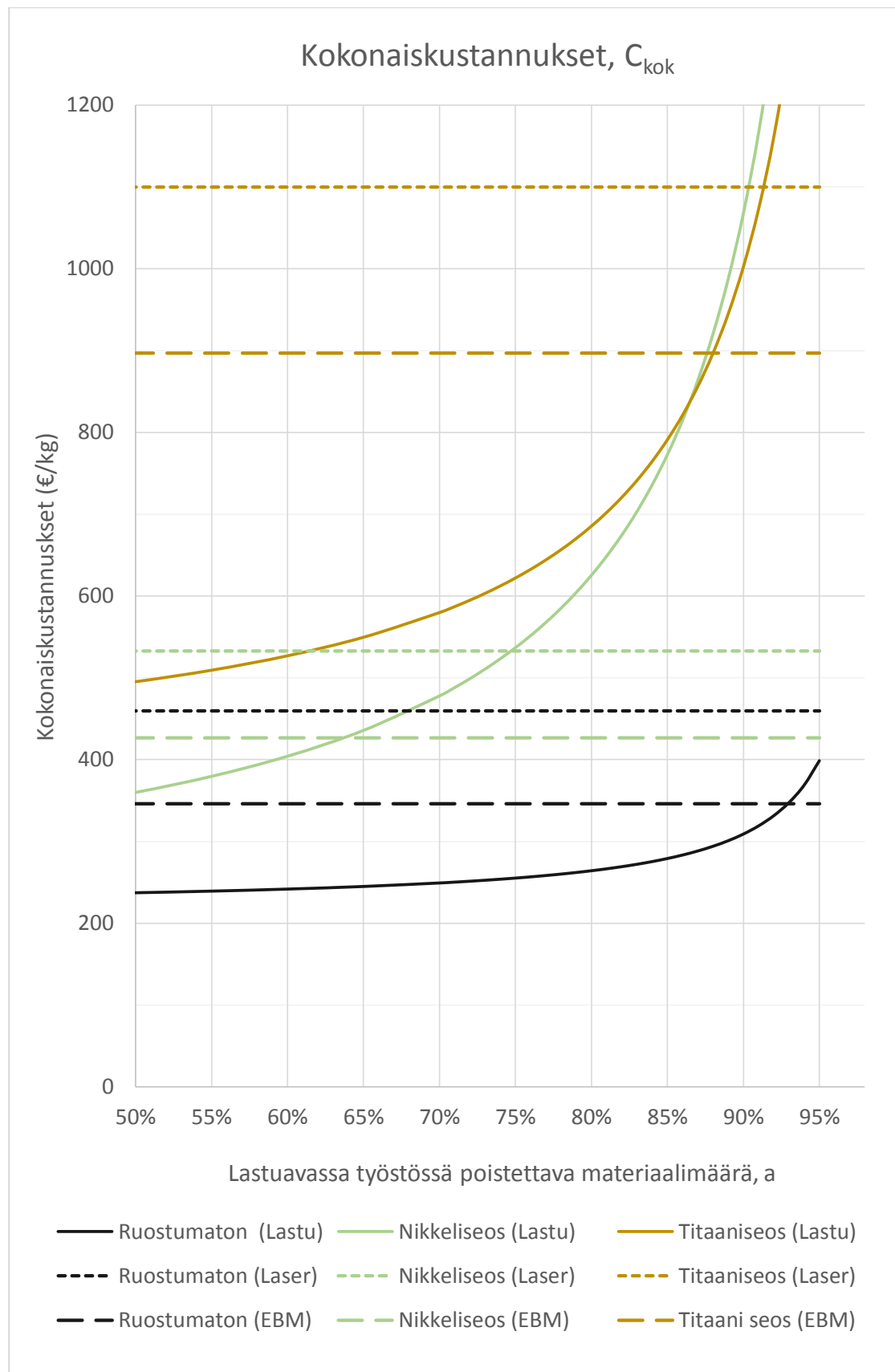
Verratessa menetelmiä keskenään on tehtävä joitain valintoja kappaleen ja laskettavien parametrien suhteen. Tulevissa kokonaiskuluvertailuissa käytetään aikaisemmin mainitun taulukon 8 sekä seuraavaksi esitetyn taulukon 10 mukaisia arvoja. Kustannuksien kehitykset on nähtävissä kaavioista 6 ja 7. Titaanisen tuotteen kustannuksissa on syytä huomioida, että aineen tiheys on puolet ruostumattomasta ja nikkelseoksista. Tuotteen muodostuminen vaatii siis massallisesti vain puolet siitä mitä näillä toisilla.

Taulukko 10. Kustannuslaskelmiin käytettäviä arvoja.

	<i>Lastuavakoneistus</i>			<i>Laserkoneistus</i>			<i>Elektronikoneistus</i>		
	Rst	Ni	Ti	Rst	Ni	Ti	Rst.	Ni	Ti
<i>Tiheys</i> [kg/dm ³]	7,95	8,44	4,50	7,90	8,40	4,41	7,90	8,40	4,41
<i>Materiaali</i> [€/kg]	6,50	62,50	40,00	94,00	180,0	420,0	94,00	180,0	420,0
<i>Koneistus</i> [€/h]	61,45	78,95	78,95	18,70	18,70	18,70	29,40	29,40	29,40
<i>Asetus</i> [€/h]	44,08	44,08	44,08	36,66	36,66	36,66	47,30	47,30	47,30



Kaavio 6. Tuotekustannukset eri menetelmillä.



Kaavio 7. Kokonaiskustannukset eri menetelmillä.

Edellä esitetystä kaavioista nähdään, että tuotekustannuksien kannalta ruostumattomasta tehtävä tuote on käytännössä aina edullisempi valmistaa lastuavalla työstöllä. Sen sijaan nikkeliseoksellisen on kannattavaa jo tehdä lisäävästi, kun poistettava määrä aihioista on 80 % luokkaa. Titaanissa vastaava luku on 93 % luokkaa. Kun kustannuksiin lisätään asetuksista aiheutuvat kustannukset, kokonaiskustannukset ovat vielä suotuisempia lisääville menetelmille.

Kustannuksien leikkauskohdat ovat niin ikään laskettavissa olevia arvoja, jolloin kustannukset yhdistetään yhtäsuuruuslausekkeeksi ja etsitään tämän yhtälön nollakohta poistettavan materiaalmäärän suhteen. Menetelmällä saadaan seuraavat yhtälöt:

$$a_c = \frac{C_{tuote,PBF} - P_{aihio}}{\frac{P_{ajo,lastu}}{Q_{lastu} * \rho_{mat,lastu}} + C_{tuote,PBF}} \quad (22)$$

$$a_{c,kok} = \frac{C_{tuote,PBF} - P_{aihio} - C_{asetus,lastu}}{\frac{P_{ajo,lastu}}{Q_{lastu} * \rho_{mat,lastu}} + C_{tuote,PBF} - C_{asetus,lastu}} \quad (23)$$

jossa a_c = Tuotekustannuksien leikkauskohdat poistettavan materiaalin suhteen

$a_{c,kok}$ = Kokonaiskustannuksien leikkauskohdat poistettavan materiaalin suhteen

Sijoittamalla yhtälöihin (22) ja (23) lukuarvot saadaan leikkauskohtien tuloksiksi taulukon 11 mukaiset arvot.

Taulukko 11. Kustannuksien leikkauskohdat

	a_c (%)		$a_{c,kok}$ (%)	
	Laser	Elektroni	Laser	Elektroni
<i>Ruostumaton</i>	98 %	97 %	96 %	93 %
<i>Nikkeliseos</i>	84 %	79 %	75 %	64 %
<i>Titaaniseos</i>	94 %	93 %	91 %	88 %

Taulukon 11 arvoista nähdään, että annetuilla arvoilla ruostumattomissa teräksissä PBF-koneistuksen kustannustehokkuus ei ylitä lastuavan työstön tehokkuutta kuin hyvin suurissa materiaalin poistoissa. Tämä pätee myös titaaniseoksien yhteydessä. Nikkeliseoksissa sen sijaan PBF:n parempi kustannustehokkuus saavutetaan jo suhteellisen reaalissa materiaalin poistoissa. Kustannustekijöiden prosentuaalinen kertymä kokonaiskustannuksiin on nähtävissä taulukosta 12.

Taulukko 12. Kustannustekijöiden kertymä.

		<i>Ruostumaton</i>	<i>Nikkeliseos</i>	<i>Titaaniseos</i>
<i>Lastuava</i> ($\alpha=75\%$)	Materiaali	10 %	47 %	26 %
	Koneistus	3 %	15 %	11 %
	Asetus	87 %	39 %	63 %
<i>Laser</i>	Materiaali	23 %	37 %	42 %
	Koneistus	72 %	59 %	54 %
	Asetus	5 %	4 %	4 %
<i>Elektroni</i>	Materiaali	30 %	46 %	51 %
	Koneistus	61 %	47 %	43 %
	Asetus	9 %	7 %	6 %

Kustannustekijöiden kertymästä nähdään, että annetuilla arvoilla lastuavalla koneistuksella tehdyn tuotteen suurin menoerä on ruostumattoman ja titaanin tapauksessa asetuskustannukset. Nikkeliseoksessa suurin kustannuserä on itse materiaali. Koneistus ei vaikuta juurikaan tuotteen kustannuksiin. Laserkoneistuksessa sen sijaan koneistuskustannukset ovat itsessään suurin menoerä, mutta materiaalin hinnallakin on osuutensa kustannuksiin. Elektronikoneistuksessa materiaalin ja koneistuksen kustannukset ovat hyvin lähellä toisiaan. Tapauksissa, joissa asetusajojen suhteellinen osuus on suuri, tuotantosarjan koon kasvattaminen laskee merkittävästi tuotteen valmistuskustannuksia. Pienen asetusajan osuudessa ei tuotantosarjan kasvatuksessa saavuteta juurikaan etua.

On syytä muistaa, että nämä RENI-laskelmat ottavat kantaa lastuavassa koneistuksessa rouhintaan, laserkoneistuksessa valmistajan ilmoittamiin perusarvoihin ja elektronikoneistuksessa osittain myös arvioihin. Tästä syystä varsinkin koneistuskustannuksien tuloksia kannattaa pitää vain suuntaa antavina.

Koneenrakennuksen näkökulmasta lastuavasti koneistetun tuotteen tuotteellinen arvo tehdään useimmiten vasta viimeistely vaiheessa, jolloin vaihdetaan yleensä teräpaloja ja syöttöarvoja. Tämä on tosin mahdollista tehdä heti rouhintakoneistuksen jälkeen samassa koneessa samoilla kiinnityksillä. Lisäävästi koneistetun kappaleen arvo voi syntyä jo laser- tai elektronikoneistuksen aikana, kuten sisäisillä jäähdytyskanavilla, mutta kappale vaatii vielä erilliset koneet ja menetelmät pinnankarheus- ja toleranssiviimeistelyjä varten. Jo pelkästään tukirakenteen poisto vaatii vähintään käsin tehtävää työtä. Tuotteen muotoja voidaan lisäksi optimoida valmistusmenetelmälle sopivaksi niin, että täysin erinäköiset kappaleet voivat toimia käyttökohteessaan täysin samalla tavoin.

Edeltävien seikkojen takia tuotteen valmistukseen on joskus myös mahdollista käyttää hybridivalmistusta, eli jotkin kohdat tehdään lastuavalla koneistuksella ja osa lisäävällä koneistuksella. Tätä varten on myös tutkittu DFM-ohjelmia helpottamaan tällaista arviointia. [43]

5 LIUKURENGASTIIVISTEEN TOTEUTUS LISÄÄVÄLLÄ MENETELMÄLLÄ

5.1 MENETTELY

Asetettuun tutkimuskysymykseen vastaamiseksi suurin menettely kattaviin tuloksiin on kokeellinen testaaminen. Kokeen päämääränä oli toteuttaa liukurengastiivisteiden rakenneosat lisäävien menetelmien laitteilla, jotka kykenevät käsittelemään metalleja. Taustatutkimuksen perusteella PBF-menetelmä koettiin parhaimmaksi vaihtoehdoksi niin menetelmän ominaisuuksien kuin palvelutarjonnan ansiosta. Luvussa 4.1.3 esitetyn käyttöfilosofiataulukon 2 mukaan tämän kokeen tutkimus sijaitsee spesifin- ja tuotantovalmistuksen välimaastossa.

Prosessiteollisuudessa mekaanisen tuotteen tärkein ominaisuus on korroosiokesto. Tuotteella ei ole käyttöarvoa, jos se ei kestä käsiteltäviä aineita. Tästä syystä kokeen yksi tärkeimmistä tavoitteista on selvittää markkinoilla oleva pulverimateriaalitarjonta ja etsiä niistä sopivia vaihtoehtoja liukurengastiivisteelle. Saatavilla olevista materiaaleista tehdään korroosiotutkimus, jonka tuloksia arvioidaan kirjallisuudesta löytyvään tietoon.

Tuotteen muotoja ja ominaisuuksia ei ole tarkoitus muuttaa olennaisesti vakiotuotteeseen nähden, jotta vertailu markkinoilla oleviin tuotteisiin olisi mahdollisimman mielekäs. Tuotteen muotojen muokkaaminen keskittyykin valmistettavuutta parantavien piirteiden muokkaamiseen. Tavoitteena on suunnitella tuote uudelleen niin, että se on optimoitu lisääville menetelmille ollen silti jatkovalmistettavissa vertailukelpoiseksi liukurengastiivisteeksi. Vastaavuus todennetaan mekaanisella testauksella.

Kuten kaikessa valmistavassa teollisuudessa, tavoitteena on myös saada käsitys tuotteen mahdollisista valmistuskustannuksista sekä valmistusajasta. Kaikki tavoitteet löytyvät tiivistetysti taulukosta 13.

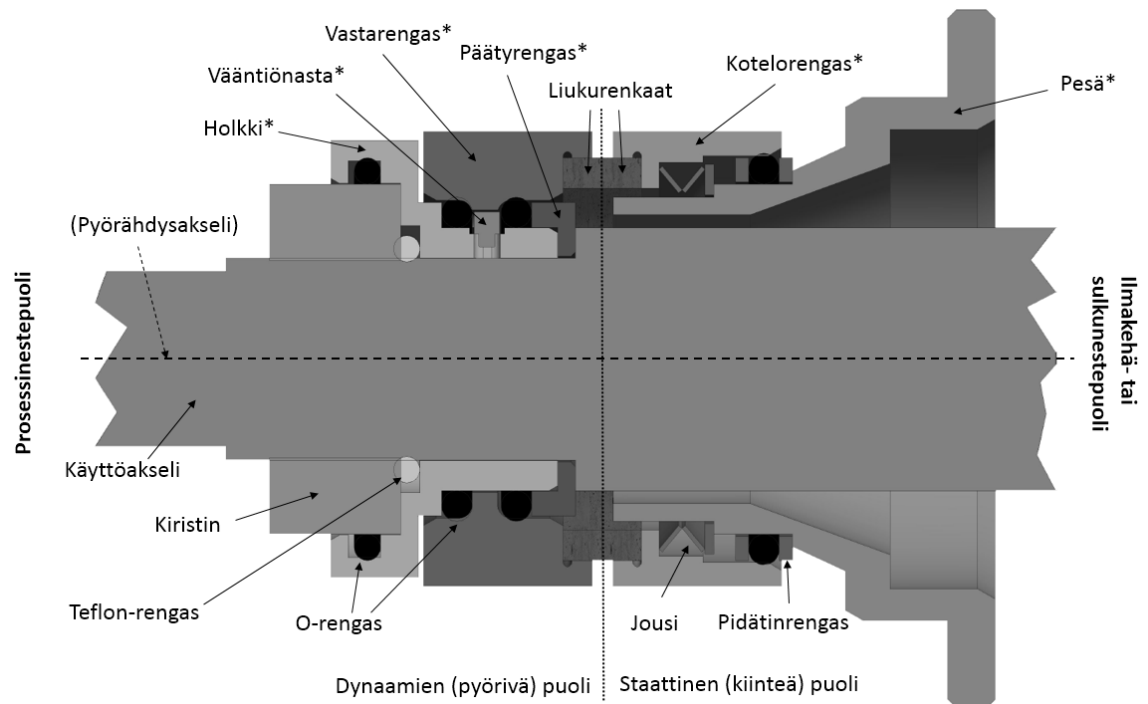
Taulukko 13. Kokeen tavoitteet.

<i>Osa-alue</i>	<i>Tavoitteet</i>	
<i>Korroosio</i>	Markkinoilla olevien materiaalien korroosio-ominaisuuksien selvittäminen	
<i>Suunnittelu ja valmistus</i>	Rakenneosien ominaisuudet eivät toiminnaltaan poikkea vakiotuotteesta	Osat optimoidaan valmistustekniikoiden kannalta
<i>Testaus</i>	Valmistettavan tuotteen eron selvitys vakiotuotteeseen nähden.	
<i>Kustannukset</i>	Kyetään ottamaan kantaa tuotantokustannuksiin	Selvittää AM:n tuomaa joustavuutta tuotantoon

5.1.1 TUOTE

Kokeen liukurengastiiviste on erään pumpun valmistajan tuotteessa käytettävä, 30 mm halkaisijallisen akselin tiiviste, jonka liukurenkaat on tehty piikarbidi-keräämistä. Tutkittavat osat ovat prosessinesteen kanssa kosketuksessa olevia osia eli kyseessä on niin sanotusti yksitoiminen tiiviste. Modulaarisuutensa ansiosta tämä tiiviste on myös laajennettavissa kaksitoimiseksi eli tiivisteeseen sisään voidaan luoda vastapaine. Kyseinen tiiviste on nähtävissä kuvassa 17. Tasapainotussuhde k on prosessinesteen puolella 0,9 eli tiiviste on tasapainotettu.

Rakenneosien kokonaistilavuus on $77,73 \text{ cm}^3$ eli ruostumattomasta teräksestä tehtynä osat painavat noin 0,62 kg. Suurin kappale on 43,7 mm korkea ja 79,9 mm leveä. Kappaleiden yleistoleranssi on ISO 2768 –mK, mutta niistä löytyy myös H7 (+0,025/0) ja h8 (0/-0,039) tolerointeja. Lisäksi liukurenkaan lämpöahdistussovite vaatii osaltaan hyvää ympyrämuotoisuutta. Tuotteen peruspinnan karheus on $R_z 25 \mu\text{m}$ ($\approx R_a 6,25 \mu\text{m}$) ja staattisten O-renkaiden kohdalla $R_z 10 \mu\text{m}$ ($\approx R_a 2,5 \mu\text{m}$) sekä dynaamisilla O-rengaspinnoilla $R_z 5 \mu\text{m}$ ($\approx R_a 1,25 \mu\text{m}$). Kyseiset pinnat ovat samoilla pinnoilla, jotka ovat toleroitu edellä ilmoitetulla tavalla. Pinnankarheusarvojen käännökset on tehty standardi DIN 4768-1 / ISO 1302 mukaan. Lämpöahdistussovite tehdään tämän kokoiselle tuotteelle yli 400 asteen lämpötilassa.



Kuva 17. Kokeessa käytettävä liukurengastiiviste. Tähdellä merkityt osat ovat tutkittavia rakenneosia.

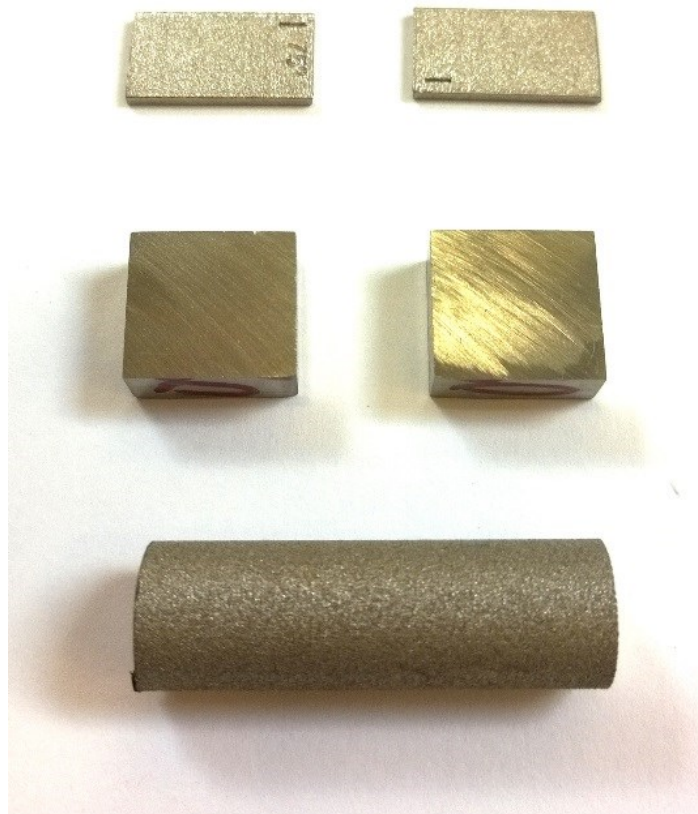
5.1.2 YHTEISTYÖKUMPPANIN VALINTA

Koetta varten kartoitettiin markkinoilla olevia metallisten järjestelmien laitevalmistajia ja eurooppalaisia palveluntarjoajia. Laitevalmistajia löytyi yhteensä 9 yritystä, joista 7 toimii Euroopassa. Eurooppalaisia palveluntarjoajia löytyi tutkimuksen aikana 11 yritystä. Pulveripetisulatusmenetelmä todettiin kirjallisuusselvityksen tietojen perusteella soveliaimmaksi menetelmäksi, johtuen muista menetelmistä paremmista ominaisuuksista valmistettavalle kappaleelle sekä mahdollisen tuotantosoveltuvuuden ansiosta. Lisäksi PBF-menetelmän palveluntarjoajia oli huomattavasti enemmän.

Osien valmistettavuutta ja testikappaleiden toimitusta tiedusteltiin yhteensä 6 eri laitevalmistajalta ja palveluntarjoajalta, joista sijainniltaan lähin ja tästä tutkimuksesta kiinnostunut laserjärjestelmävalmistaja EOS GmbH:n suomalainen toimipiste EOS Finland Oy valikoitui yhteistyökumppaniksi. Yritykseltä saatiin tietoa materiaaleista, lasermenetelmän tekniikasta sekä testikappaleet kokeiluja varten. Yhteistyötaho oli oivallinen, sillä kyseinen toimipiste vastaa EOS-yhtiön materiaali- ja prosessikehityksestä.

5.2 MATERIAALIEN KORROOSIOTESTAUS

Korroosiotestissä pyrittiin tutkimaan Tiivistetekniikan käyttämiä materiaaleja, mutta täysin vastaavia materiaaleja ei ole vielä markkinoilla. Testaus tehtiinkin niin kutsutulla haponkestävällä teräksellä 316L (EN-1.4404) ja nikkeliseoksella Inconel 718 (EN-2.4668). Nämä materiaalit olivat tuotettu yhteistyöyrityksen omista materiaaleista ja niiden tuotenimet ovat EOS 316L ja EOS IN718. Titaania ei pystytty testaamaan, koska sopivia testipaloja ei ollut saatavilla korroosiotestin alussa. Testikappaleet on nähtävissä kuvassa 18.



Kuva 18. Korroosiotestattavat kappaleet. Ylhäällä EOS IN718 ja keskellä sekä alin EOS316L. Alin kappale on 30 mm pitkä.

EOS 316L:n PREN-arvo on 26,025 eli se on laskennallisesti korroosio-omaisuuksiltaan heikompia kuin yrityksen käyttämä SAF 2205 (PREN = 35,44). EOS IN718 PREN-arvo on 26,24, joka on huomattavasti vähemmän kuin käytetyn Hastelloy C-4:n (PREN = 60,20). PREN-arvojen perusteella testattavat materiaalit eivät suoraan korvaa tällä hetkellä käytössä olevia materiaaleja, joten testattavien ominaisuuksia verrataan vastaavaan ”tankotavaraan”. Korroosiotesti ottaa siis kantaa siihen, miten pulveritoimittajan ilmoittama materiaalikuvauksen oikeasti vastaa yleistä kauppallista nimikettä.

Korroosiotesti suoritettiin Aalto-yliopiston koneenrakennustekniikan materiaali-laboratoriossa ja testejä toteutettiin yhteensä kolme, jotka poikkesivat hieman toisistaan. Testeihin sovellettiin standardia NACE TM0169/G31-12a "Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals", joskin standardin suosittelemaa testin toistoa ei suoritettu. Testijärjestelmä on nähtävissä kuvassa 19.



Kuva 19. Korroosiotestijärjestelmä.

Korroosio-olosuhteet haluttiin happamasta ja emäksisestä ympäristöstä, joten aineiksi valikoitui prosessiteollisuudessa usein käytetyt rikkihappo (H_2SO_4) ja lipeä (NaOH). Erityisesti rikkihapon korrotiivisuus vaihtelee konsentraation mukaan, joten kokeessa 1 ja 2 käytettiin rikkihaposta eri konsentraatioita. Kokeessa 3 tutkittiin laserkoneistetun 316L pinnan vaikutusta korroosioon verrattuna koe 2:n sileään pintaan. Testinesteen määrä dekantterilasissa oli kaikissa tapauksissa 50 ml ja mahdollinen haihtuminen estettiin parafilmikelmulla. Testit tehtiin huonelämpötilassa eli 20 °C ja kokeiden tulokset on nähtävissä taulukoista 14, 15 ja 16.

Taulukko 14. Koe1:n tulokset.

Kestoaika:	Korroosionopeus (mm/y)	
189 h \approx 8 vrk	H₂SO₄ c = 96 %	NaOH c = 33,3 %
EOS 316L	0,0264	0
316L [44]	< 0,1	< 0,1
EOS IN718	0,2421	0
Alloy 625 [45]	<0,5	<0,025

Taulukko 15. Koe2:n tulokset.

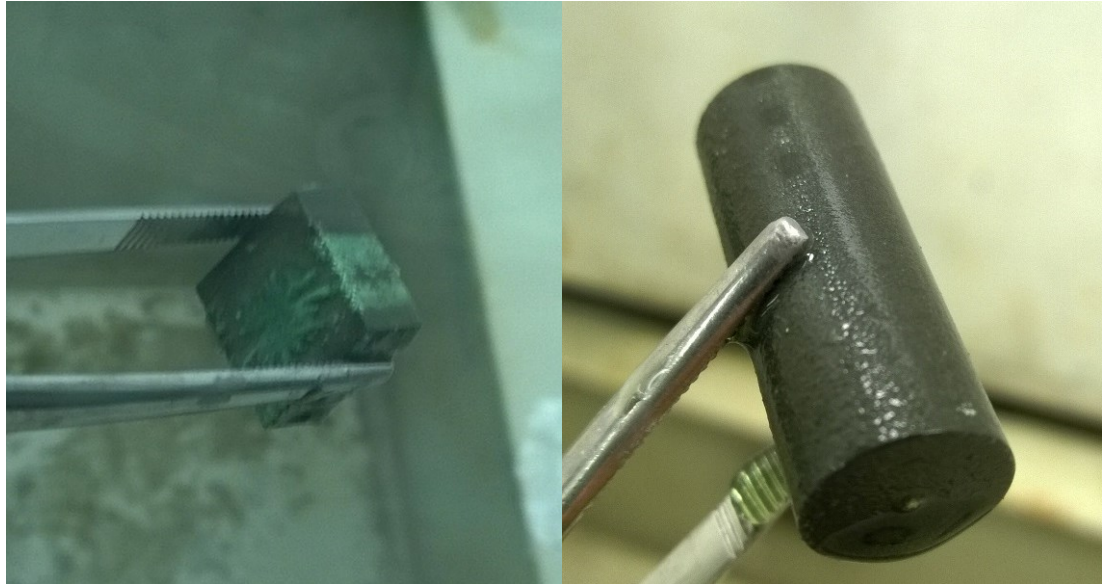
Kestoaika:	Korroosionopeus (mm/y)	
242h \approx 10 vrk	H₂SO₄ c = 62 %	NaOH c = 33,3 %
EOS 316L	0,8374	0,003
316L [44]	> 1,0	< 0,1
EOS IN718	0,0038	0,0047
Alloy 625 [45]	<0,01	<0,025

Taulukko 16. Koe3:n tulokset.

Kestoaika:	Korroosionopeus (mm/y)
670,5 h \approx 28 vrk	H₂SO₄ c = 62 %
EOS 316L	0,2051
316L [44]	> 1,0

Kokeista 1 ja 2 nähdään, että EOS:n toimittamien kappaleiden korroosionopeudet ovat samaa luokkaa kuin tankotavaralle annetut arvot. Mielenkiintoista on, että korkean konsentraation rikkihapossa ruostumaton teräs on kestävämpää kuin nikkeliseos. Asia muuttuu 60-70 % konsentraatioissa, jolloin rikkihappo on ruostumattomalle teräkselle syövyttävintä [4]. Tällöin nikkeliseoksessa ei juurikaan tapahdu korroosiota. Korroosion kannalta IN718 ei ole kuitenkaan optimaalisin metalli, sillä sen käyttökohde on korkean lämpötilan sovellutuksissa. Tästä syystä juuri tälle seokselle ei löydetty korroosioarvoja, joten vertailukohtana käytettiin toista korkeaan lämpötilaan tarkoitettua seosta (Inconel) 625:ää. Lipeän testaus ei juurikaan antanut merkittävää tietoa, sillä natriumhydroksidi alkaa syövyttää metalleja vasta yli 80 °C:ssa [44], johon ei olisi ollut mahdollisuutta tässä testissä.

Kokeen 3 oli tarkoitus selvittää pinnanlaadun vaikutusta korroosion käyttäytymiseen, minkä tulokset on nähtävissä kuvassa 20. Testin pieni korroosionopeus verrattuna kokeeseen 2 johtuu nähtävästi siitä, että reagoivat partikkelit ovat loppuneet. Standardin suositus testinesteelle olisi ollut 28 vuorokauden kokeelle 50 ml:n sijaan 260 ml.



Kuva 20. Pinnan vaikutus korroosiokäyttäytymiseen, kappaleet nostettuna dekanterilasista.

Kokeessa 3 huomattiin, että molemmissa tapauksissa 316L tummuu ja dekanterilasin neste muuttui vihreäksi. Vihreä väri tulee kemiallisen reaktion synnyttämästä rautasulfaattista. Kiillotetun kappaleen pinnalla on nähtävissä vihreää ”kasvustoa”, jonka kohdalla oli puhdistuksen jälkeen samanmuotoinen kolo. Laserkoneistuksen jäljiltä jääneissä pinnoissa tällaista ei havaittu. Syntyvät sulfaatit nähtävästi irtoavat paremmin karheasta pinnasta estäen korroosion keskittymisen tietylle alueelle.

Tehtyjen testien perusteella voidaan todeta, että ainakin EOS:n toimittamat materiaalit vastaavat kemiallisilta ominaisuuksistaan yleisesti kaupallisesti tunnettuja materiaaleja. Tämä siis tarkoittaa, että pulveritoimittajan tuotteita voidaan käyttää samanlaisissa ympäristöissä kuin tankotavaraa, kun kyse on kemiallisesta kestävyydestä. Pinnan viimeistely kuitenkin vaikuttaa korroosio-ominaisuuksiin.

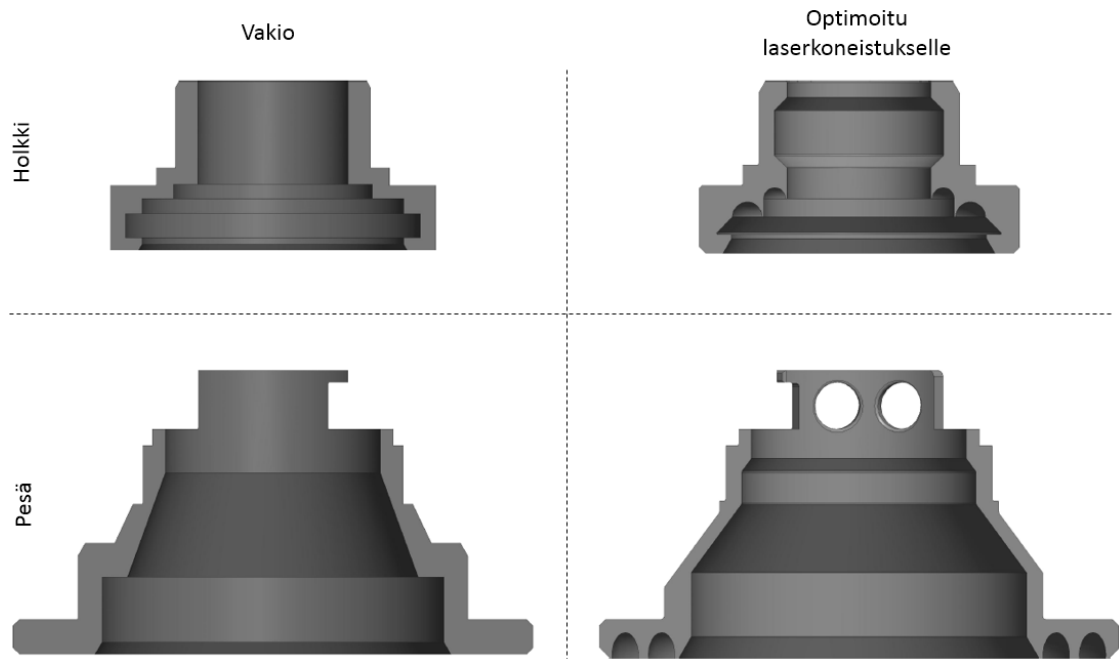
5.3 OSIEN TOTEUTUS

5.3.1 SUUNNITTELU

Tutkittavat rakenneosat toimivat hyvin käyttökohteessaan, joten kappaleiden toiminnollisuuteen ei haluttu puuttua. Osien muodot ovat optimaalisia sorvaukselle, mikä aiheutti haasteita osien optimointiin laserkoneistukselle. Testausmateriaaliksi valikoitui EOS 316L ruostumaton teräs, sillä se vastaa myötörajaltaan Tiivistetekniikan käyttämää SAF 2205:sta (EOS 316L: 470 MPa, SAF2205: 485 MPa). Laserkoneistetun EOS 316L:n myötöraja on mielenkiintoinen, sillä tankotavaraisten 316L:n myötöraja on puolet pienempi [46]. EOS 316L on vasta hiljattain markkinoille tullut materiaali ja sitä tutkitaan yhä.

Suunnittelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että laserkoneistuksen oletettiin pystyvän tekemään osat ainakin yleistoleranssi ISO 2768 –mK:n mukaisesti ja laserkoneistettu pinta saadaan alle Ra 6,25 µm:n kuulapommituksella. Tähän oletukseen päästiin toimittajan nettisivulta saatavan materiaalin tuoteselosteen ja yhteistyötahon haastattelun pohjalta. Toleroidut mitat ja alle Ra 3,2 µm pinnan karheudet katsottiin parhaimmaksi tehdä lastuavasti sorvaamalla. Osien suunnittelussa piti tästä syystä ottaa myös huomioon kappaleiden sorvattavuus laserkoneistuksen jälkeen. Osista suunniteltiin ensin valmis muoto, joista muokattiin optimoitu 3D-malli laserkoneistusta varten. Suunnitteluun saatiin myös ohjeita ja neuvoja yhteistyötaholta.

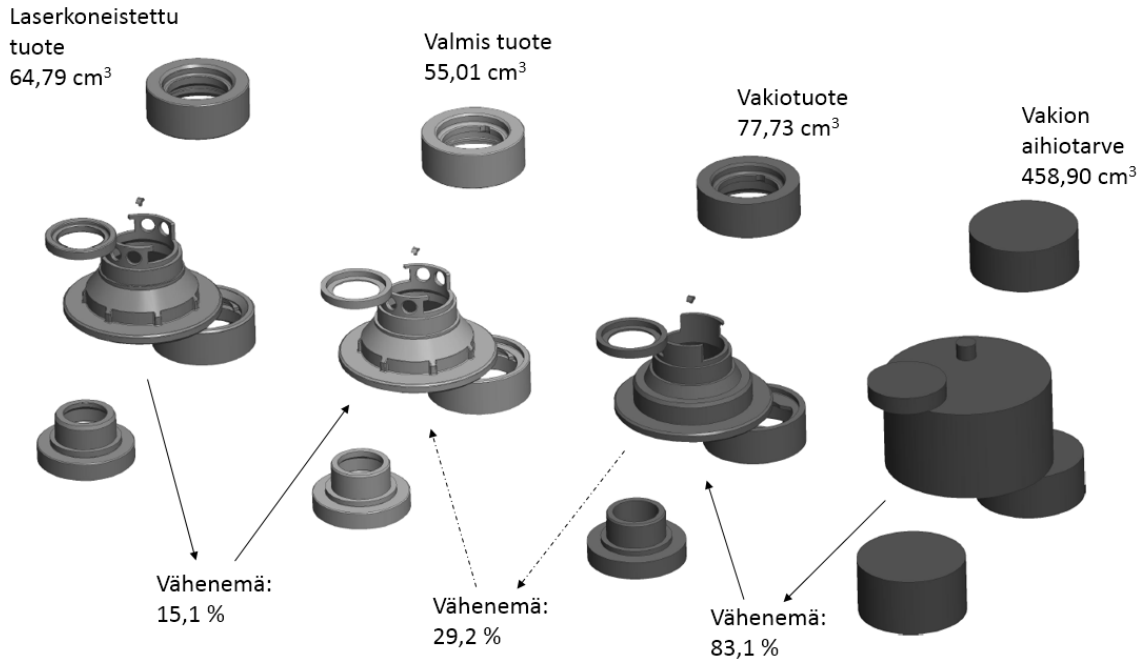
Koska pulverimateriaalin ja koneajan hinta tiedettiin korkeiksi, osien uudelleen suunnittelussa keskityttiin materiaalitarpeen vähentämiseen niin osien kuin tukimateriaalin suhteen. Kahden osan optimoidut muodot ja niiden vertaus vakio-osaan on nähtävissä kuvassa 21. Osat on mallinnettu PTC:n Creo Parametric Student Edition 2.0:lla.



Kuva 21. Vakio-osien ja optimoitujen osien erot.

Massan poisto on jaettavissa kolmeen eri kategoriaan: muodon muuttaminen, materiaalin ”poisleikkaaminen” sekä tukimateriaalitarpeen eliminointi. Muodon muuttaminen on nähtävissä pesän seinämien ohennuksissa ja tyviosaan tehdyissä rivoissa (ei näy kuvan 21 orientaatiosta). Poisleikkaus on nähtävissä holkin kaulan avauksena sekä pesän yläalueen reikinä ja ala-alueen laipan leikkauksissa. Tukimateriaalin tarvetta eliminoitiin molemmissa tapauksissa niin, että mahdollisimman harvoissa tapauksissa alitetaan 45° kulma horisonttitasoon nähden. Jos kyseinen kulma olisi aiheuttanut turhan materiaalin liiallista kasvua, tukimateriaalin tarvetta vähennettiin holvikaarien avulla.

Osien rakennussuunnat valittiin siten, että tukimateriaaliin kosketuksissa olevat pinnat ovat myös toleroituja tai pinnankarheudeltaan kriittisiä pintoja. Tällöin tukimateriaalin ja helpotusten poistot sekä osan viimeistely voidaan tehdä viimeistelysorvauksessa yhtä aikaa. Viimeistelysorvattavien pintojen lastuamisvaraksi mallinnettiin varmuuden vuoksi reiluhko 0,5 mm (halkaisijamitalla 1 mm). Lopulliset tilavuserot optimoidun ja vakiotuotteen välillä on nähtävissä kuvassa 22.



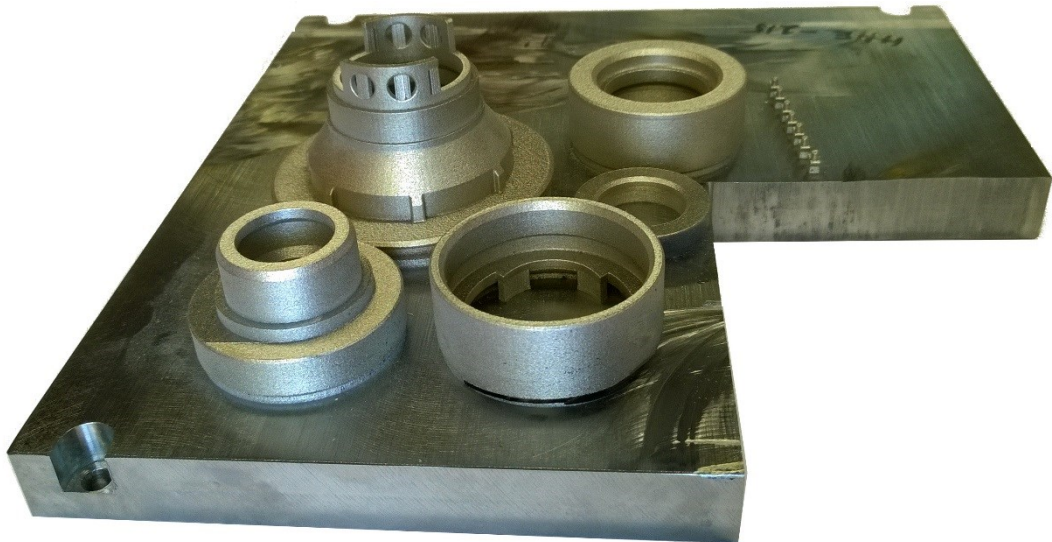
Kuva 22. Tilavuussuhde-erot.

Optimoinnin tuloksena valmiin tuotteen tilavuus on noin 30 % vähemmän kuin vakiotuotteen eli käytännössä kolmanneksen kevyempi. Tällä suunnittelulla on kuitenkin laserkoneistetuista kappaleista poistettava materiaalia 15 %, jotta valmis tuote saadaan aikaiseksi. Kokonaisuudessaan laserkoneistettava tilavuus olisi 3D-mallin mukaan 68,65 cm³, kun huomioon otetaan tukimateriaalin tarve. Vertailun vuoksi vakiotuotteen valmistaminen aihiotangosta vaatii yli 80 % materiaalipoiston, kun aihion halkaisija on osan halkaisijan mitan ylittävä lähin 5 mm:llä jaollinen mitta ja työstövara akselisuuntiin 2 mm.

Suunniteltujen osien toimivuutta todennettiin muovisin testikappalein, jotka tehtiin Aalto-yliopiston tuotantotekniikan laboratorion FDM-laitteella (*Fused Deposition Modeling*).

5.3.2 VALMISTUS

3D-mallien valmistuttua ne käännettiin stl-tiedostomuotoon ja lähetettiin yhteistyöyritykselle. Stl-malleihin lisättiin tukirakenteet Materialise Magics RP-ohjelmassa ja koneen ohjelmointi (CAM) tehtiin EOS PSW:llä (*Process SoftWare*). Käytettävä kone oli EOS M280, jossa on 400W:n laser. Laseria ohjattiin ääriiviiva- ja rasteriohjauksella kerrospaksuuden ollessa 0,04 mm. Valmistuspaletille tehtiin myös muuhun tarpeeseen meneviä tuotteita, joten laserkoneistuksen kokonaisaika oli noin 20,5 h. Osat toimitettiin paletissa kiinni, joka on nähtävissä kuvassa 23.



Kuva 23. Osat laserkoneistettuina. Paletista on leikattu irti kokeeseen liittymättömät tuotteet.

Suosituksen mukaisesti kappaleet irrotettiin paletista lankasauhauksella (=kipinätyöstöä). Operaatio suoritettiin Aalto-yliopiston tuotantotekniikan laboratoriossa Charmilles Robofil 400 -koneella. Leikkaus kesti kokonaisuudessaan 2 h, sillä ongelmia tuotti tukimateriaalin sisään jäänyt pulveri. Nesteeseen vapautuessaan pulveri tukki langan alaohjaimen aiheuttaen oikosulun, jolloin lanka kuumentui sulamispisteeseen ja katkesi. Tämä tapahtui 12 kertaa leikkauksen aikana ja lanka piti asettaa joka kerta uudelleen.

Irti leikattujen osien pinnat käsiteltiin EOS 316L:n tuoteselosteen mukaisesti kuulapommituksella, joskin käsittelyjauhe sisälsi kuulien lisäksi hiovia metallirakeita. Käsittelyaika oli 10 min. Osat on nähtävillä kuulapommituksen jälkeen kuvassa 24. Kyseisessä kuvassa osat on käännettynä ylösalaisin, jolloin nähdään myös tukirakenteiden muodot. Tukirakenteita on hieman liikaakin, koska CAM-ohjelmassa oli tukirakenteita tehdessä perusparametrit käytössä.



Kuva 24. Osat lankasahattuina ja kuulapuhallettuina ylösalsin käännettynä.

Osien perusmittoja mitattiin kuulapommituksen jälkeen ensin digitaalinäyttöisellä Mahr MarCal 16 ER -työntömitalla ja tämän jälkeen vielä muutamien osien ympyrämuotoisuutta Tesa Micro-Hite 3D Reflex MH3D -koordinaattimittalaitteella. Kiinnostavimpina mittoina pidettiin osien sisä- ja ulkohalkaisijamittoja, jotka ovat muodostuneet laserkoneistuksen XY-tasossa. Työntömittauksella saadut eromitat ja koordinaattilaitteella mitatut ympyrämuotoisuudet on nähtävissä taulukosta 17. Koordinaattimittalaitteessa otettiin 6 mittauspistettä jokaista mittausta kohden.

Taulukosta 17 nähdään, että käytännössä jokaisen kappaleen mitat ovat alle suunnitellun. Yleistoleranssi ISO 2768 -mK:n mukaan ulkomitat ovat sallituissa rajoissa, kun taas sisämitat menevät toleranssialueen ulkopuolelle. Tämä ei kuitenkaan haittaa osien lopullista toimivuutta, sillä kyseisten mittojen pinnat on tarkoitettu viimeisteltäviksi sorvauksella. Halkaisijoiden ympyrämuotoisuuden heitot ovat yllättävän pieniä, mikä koettiin hyväksi viimeistelysorvauksen kannalta.

Taulukko 17. Mittausdataa laserkoneistetuista osista.
d = ulkohalkaisija, D = sisähalkaisija, l = pituus, mitat millimetreissä.

		ISO 2768		Ympyrä-
		Eromitta	-mK	mäisyys
Pesä	d	-0,15	Kyllä	0,027
	D	-0,48	Ei	
Kotelo rengas	d	-0,1	Kyllä	0,027
	D	-0,48	Ei	
Vastarengas	d	0	Kyllä	0,025
	D	-0,35	Ei	0,02
Holkki	d	-0,05	Kyllä	0,024
	D	-0,4	Ei	0,02
Päätyrengas	d	-0,13	Kyllä	0,012
	D	-0,45	Ei	
Nasta	l	0,1	Kyllä	
	d	0,09	Kyllä	

Mittauksissa huomattiin myös, että mitä lähempänä mitattu kohta oli valmistuspalettia, sen lähempänä mitat olivat suunniteltua mittaa. Tämä on selitettävissä metallin lämpölaajenemisella, jolloin paletin pintaa lähellä olevat piirteet ovat tukevammin kiinni estäen lämpötilamuutoksen aiheuttamaa liikettä. Yhteistyötahon mukaan mitat saadaan koneistusprosessissa kohdilleen, kunhan laserin liikeradat EOS 316L:lle saadaan kompensoitua.

Osien pinnankarheusmittaukset vaihtelivat Ra 3,2-4,2 μm välillä eli ainakin kuulapuhallettuna osien pinnankarheus alittaa osien yleispinnankarheuden. Pinta itsessään näytti silmin nähden appelsiinin kuorta vastaavalle pinnalle. Mittalaitteena oli Mahr MarSurf PS1.

Viimeistelysorvaus suoritettiin Tiivistetekniikan toimittajan toimesta Mazak monitoimisorvilla. Lastuamisparametreinä käytettiin SAF 2205:n arvoja ja osia käsiteltiin vakiotuotteen tavoin. Koneistaja totesi haastattelussa, ettei materiaali poikennut lastuamisominaisuuksiltaan SAF 2205:sta, joskin vähäisen lastuusmäärän takia tästä ei voi tehdä varmoja johtopäätöksiä. Haastavimmaksi koettiin tukimateriaalin poisto, sillä pehmeän olomuotonsa takia sen pelättiin tyssäntyvän hajottaen terän. Viimeistelysorvatut rakenneosat on nähtävissä kuvassa 25.



Kuva 25. Viimeistelysorvatut osat. Kiiltävä pinta on lastuavan työstön ja mattapinta laserkoneistuksen jäljiltä.

Osille tehtiin sorvauksen jälkeen mittauksia koordinaattikoneella ja taulukossa 18 on poimittuna samakeskeisyysmittauksia. Taulukosta nähdään, että piirteiden keskeisyydet ovat geometrialtaan erittäin hyviä.

Taulukko 18. Piirteiden samakeskeisyyksiä, mitat millimetreinä.

<i>Kiinnitys sorvin istukassa</i>	<i>Pinta1</i>	<i>Pinta2</i>	<i>Keskeisyys</i>
-	Laser	Laser	0,056
<i>Laserpinnasta</i>	Sorvattu	Sorvattu	0,012
<i>Laserpinnasta</i>	Laser	Sorvattu	0,048
<i>Laserpinnasta</i>	Laser	Sorvattu	0,056
<i>1. kiinnitys laserpinnasta, 2. kiinnitys sorvatusta</i>	Laser	Sorvattu	0,07

Sorvauksen jälkeen kotelo- ja vastarenkaalle tehtiin lämpöahdistusovite (krymppaus) piikarbidi liukurenkaiden kanssa samalla tavoin kuin vakiotuotteen kanssa menetellään. Krympatut osat on nähtävissä kuvassa 26. Keltainen väri johtuu metallin värjäytymisestä kuumissa lämpötiloissa, mutta väri otetaan yleensä pois kevyellä hiekkapaperihionnalla. Osien annettiin levätä viikonlopun yli ennen läppäystä.



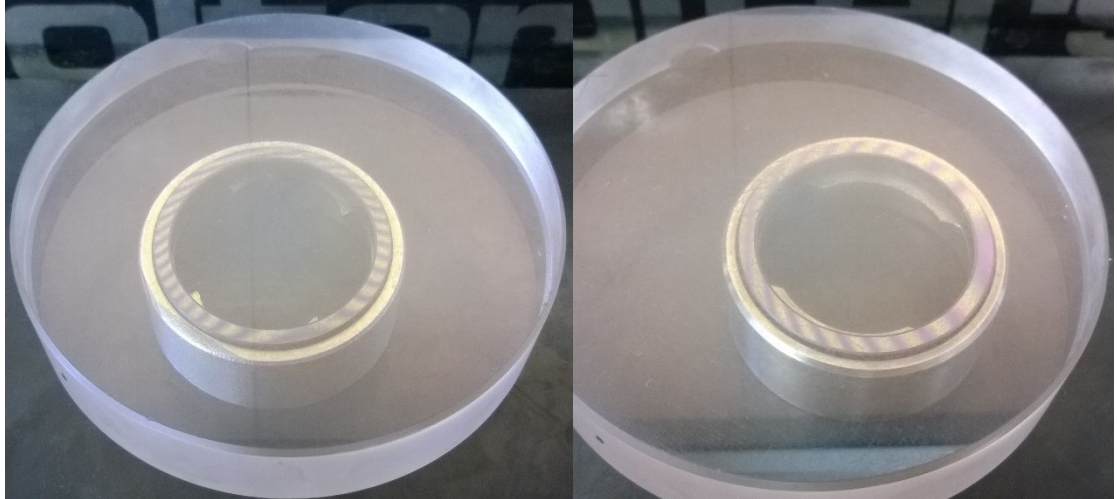
Kuva 26. Piikarbidirengaat krympattuna rakenneosiin.

Osien krympin ja läppäyksen onnistumista verrattiin vakio SAF 2205:stä tehtyihin osiin krympin aiheuttaman laajenemisen sekä liukupintojen vetelemisen muodossa. Taulukosta 19 nähdään, että laserkoneistetun kotelorengaan laajenema on yhtä suuri vakiotuotteen kanssa. Vastarengas poikkeaa noin kolmen sadasosan verran vakiosta, mutta ei kuitenkaan haitallisesti. Liian suuri laajenema tarkoittaisi ahdistussovitteen puristusvoiman jäävän pieneksi, mikä saattaisi aiheuttaa liukurenkaan irtoamisen käytön aikana.

Taulukko 19. Krympin aiheuttama laajenema. Mitat millimetreinä.

	Osa	Laajenema
<i>Laser EOS 316L</i>	Kotelorengas	0,051
	Vastarengas	0,085
<i>Vakio SAF 2205</i>	Kotelorengas 1	0,052
	Vastarengas 1	0,052
	Kotelorengas 2	0,043
	Vastarengas 2	0,053

Liukurenkaiden pinnat ovat heti läppäyksen jälkeen tasaiset, mutta rakenneosan materiaalista riippuen tämä pinta voi vääntyä ja vedellä vielä läppäyksen jälkeen. Tarkastus perustuu valospektriin, jossa valon taittumisesta syntyvät viivat ilmaisevat pinnan muotoja. Mitä suurempia viivat ovat, sitä tasaisempi liukupinta on. Liukupintojen vetelyt on nähtävissä kuvassa 27, jossa liukurenkaat on kuvattu yli viikko läppäyksen jälkeen. Kuvassa nähdään, että viivat käyristyvät hieman eli vetelyä on tapahtunut. Vetely on kuitenkin niin pientä, ettei se vaikuta tiivisteiden toimintaan.



Kuva 27. Liukurenkaiden vetelyt läppäyksen jälkeen. Vasemmalla laserkoneistettu, oikealla vakio.

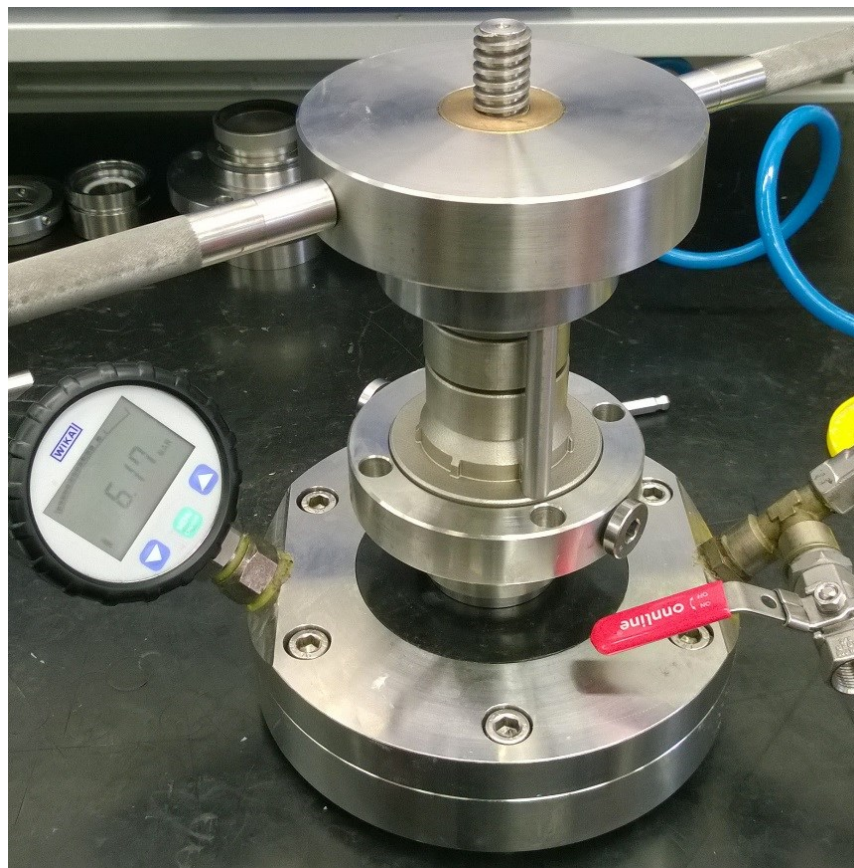
Edellä esitettyjen tulosten perusteella EOS 316L:stä laserkoneistettua tiivistettä voidaan valmistettavuudeltaan pitää vastaavan SAF 2205:stä sorvattua vakiotuotetta. Valmiiksi kokoonpantu tiiviste on nähtävissä kuvassa 28.



Kuva 28. Valmistettu tiiviste kokoonpantuna ja valmiina asennettavaksi käyttökohteeseen.

5.4 MEKAANINEN TESTAUS

Valmistetulle tiivisteelle suoritettiin koeponnistus paineilmalla, mikä kuuluu jokaisen tiivisteiden tarkastukseen ennen asiakkaalle lähettämistä. Tiiviste paineistetaan ensin paineilmajärjestelmän paineeseen ja venttiilin sulkemisen jälkeen tarkkaillaan paineen laskemisen nopeutta. Valmistetun tiivisteiden lähtöpaine oli 6,6 baria ja minuutin päästä paine oli laskenut 6,54 bariin eli paineen lasku oli 0,06 bar/min. Verroiksi tehty koeponnistus vakiotiivisteelle alkoi 6,42 barista ja paine laski minuutin sisällä 6,40 bariin eli laskunopeus oli 0,02 bar/min. Kyseiset vuodot ovat erittäin vähäisiä ja osa vuodoista johtuu myös testisysteemin liitännöistä. Tiivisteiden hylkäämiseksi käytetään ohjearvona 0,6 bar/min vuotoa, joka on jo niin suuri vuoto, ettei kyse ole enää testisysteemin liitännöistä vaan tiivisteiden vuodosta. Testijärjestelmä on nähtävissä kuvassa 29.



Kuva 29. Valmistetun tiivisteiden koeponnistus paineilmalla.

Valmistetun tiivisteiden toimivuus haluttiin varmistaa testiajolla, jossa tiiviste asennettiin oikeaan pumppuun ja akselia pyöritetään sähkömoottorilla. Vertailun vuoksi myös vakiotiivisteelle tehtiin samanlainen testiajo. Testausjärjestelmäksi valittiin Tiivistekniikan käytössä oleva kokonaisuus, jota käytetään yrityksen tuotteiden toiminnan esittelyyn asiakkaille. Testijärjestelmän pumppua oli muokattu siten, että

pumpun siivekkeet oli poistettu, jotta pumpun pyörittäminen onnistuisi ilman suurempaa vesimäärää. Tämä kuitenkin aiheuttaa muutoksia tiivisteiden kitkalämmön siirtämiseen, koska pumpun pyörittämä neste ei siirräkään lämpöä nestevirtauksen mukana.

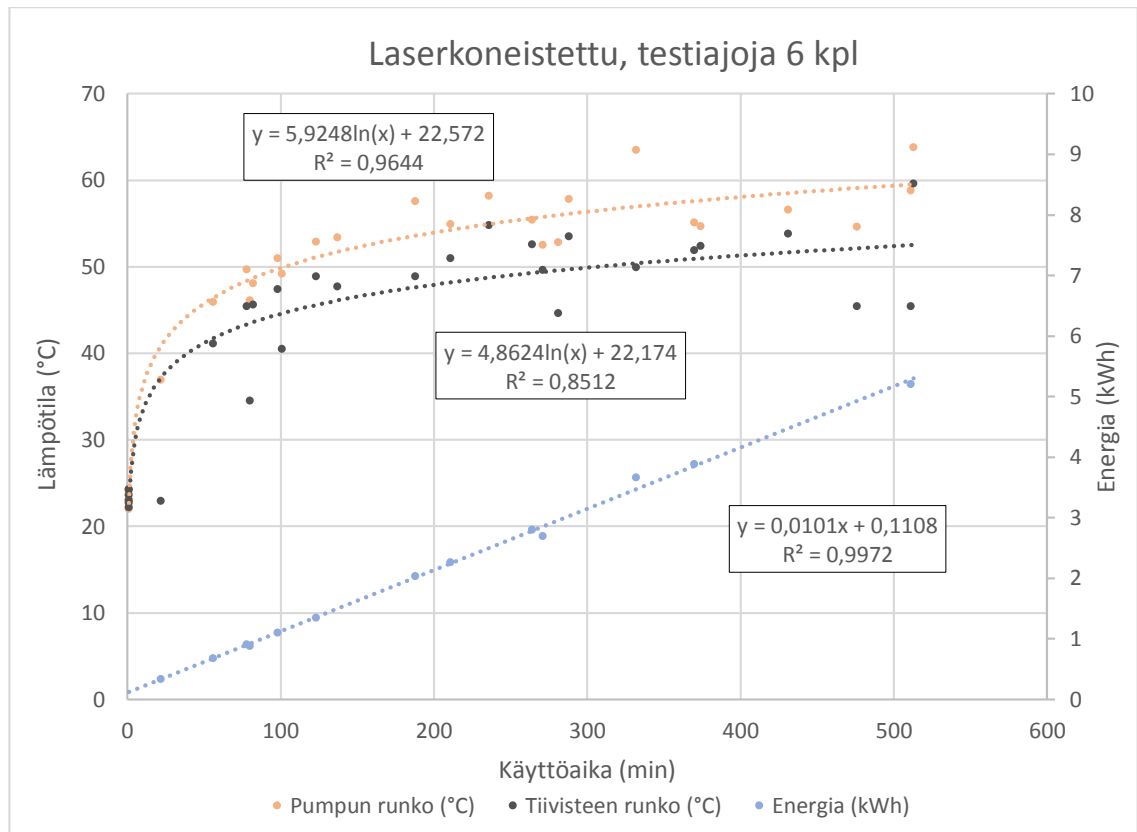
Tiivisteiden jäähdytys tapahtui testissä Tiivistetekniikan Nonflow™ -järjestelmällä, jossa tiivisteessä lämpenevä sulkuneste liikkuu järjestelmän sisällä kuljettaen lämpöä pois liukupinnoilta. Nesteen kierto perustuu osittain painovoimaan, jonka takia nestettä kierrätetään letkujen avulla tiivisteiden yläpuolella. Järjestelmään kuuluva paineentasajasäiliö poistettiin koeajo varten, jotta mahdolliset vuodot havaittaisiin laskevasta nestepaineesta. Testijärjestelmä on nähtävissä kuvassa 30.



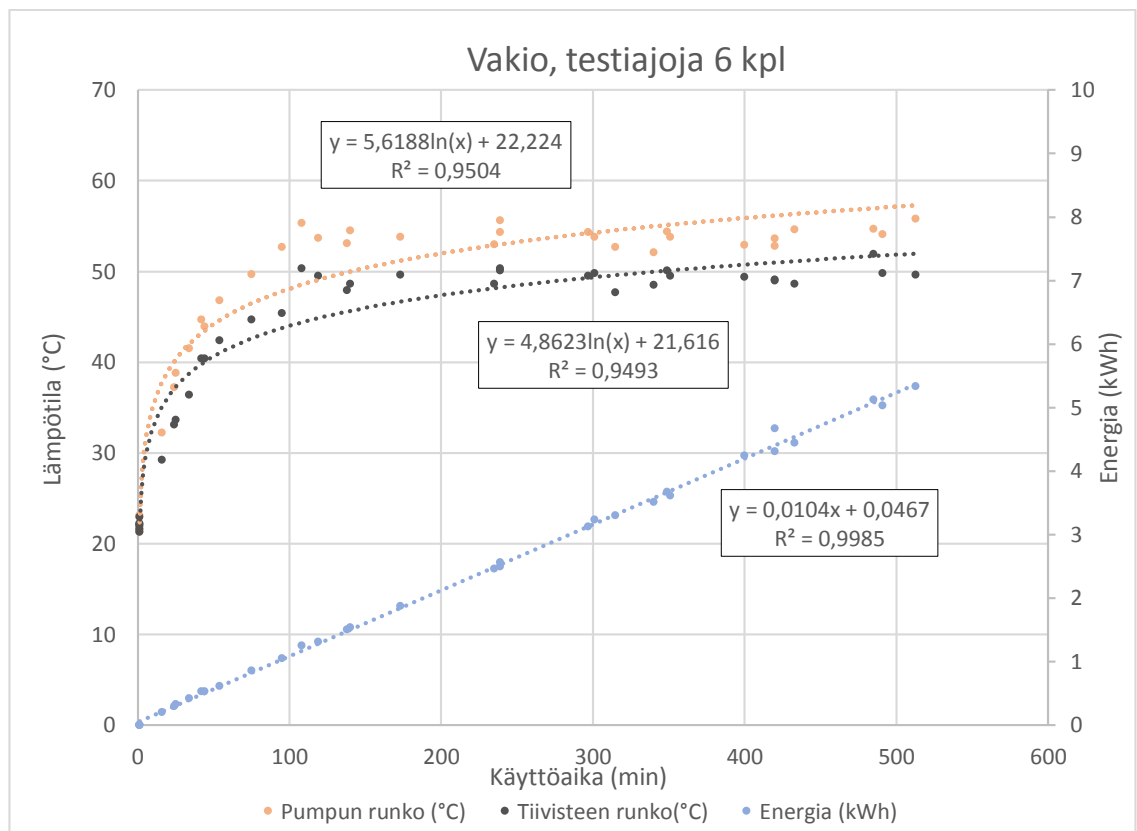
Kuva 30. Koeajon testijärjestelmä. Vasemmalla sähkömoottori ja taajuusmuuttaja, keskellä akseliyhtkin ja oikealla pumpun runko tiivisteineen. Keskellä edessä oleva metallipylväs kuuluu Nonflow™ -tiivistejärjestelmään.

Testaus suoritettiin työpäivän mittaisissa jaksoissa usean päivän ajan. Sulkunesteenä käytettiin vesijohtovettä, jonka paine määritti myös systeemin paineen. Systeemin paine tasattiin jokaisen ajon alussa ja samalla suoritettiin nesteen ilmaus. Vesijohtoverkon paine vaihteli testauksen aikana 2,2-2,6 barin välillä. Myös pumpun juoksupyörän kammio täytettiin vedellä ylikuumenemisen ehkäisemiseksi, mutta se pidettiin ilmakehän paineessa. Johtuen tällaisesta painetilanteesta, liukupintojen kitkavoima määräytyy sulkunesteen paineesta ja kotelorenkaan jousesta. Veden lämpötila ajon alussa vaihteli 21-23 °C välillä. Moottoria pyöritettiin taajuusmuuttajalla korkeinta pyörimisnopeutta 50 Hz-vakiotaaajuudella, joka vastasi n. 3000 r/min. Nopeus on lähellä pumpussa ilmoitettua maksimikierronnopeutta (3490 r/min). Taajuusmuuttaja oli Vacon HVAC.

Ajojen aikana tarkkailtiin tiivisteiden sekä pumpun rungon lämpötilakehitystä infrapunalämpömittarilla, joka oli manuaalisesti käytettävä SKF Infrared Thermometer TKTL 10. Lisäksi tarkkailtiin taajuusmuuttajasta nähtävää energiakulutusta sekä systeemin nestepainetta. Lämpötila- ja energiakulutustietoa käytettiin tiivisteiden vertailuun ja nestepaineen tarkkailulla varmistettiin kitkavoimien pysyvän samoissa arvoissa. Mittausajankohdat olivat satunnaisia ja niitä ajoitettiin vaihtelevasti pitkin ajopäivää. Kaiken kaikkiaan testiajoja tehtiin molemmille tiivisteille 6 päivän ajan testiajon pituuden vaihdellessa 6-8,5 h välillä. Testissä ajettiin ensin laserkoneistettu tiiviste ja tämän jälkeen vakiotiiviste. Ajojen tulokset on nähtävissä kaavioista 8 ja 9. Kaaviot ja suuntaviivasovitukset on tehty Microsoft Excel 2013:lla.



Kaavio 8. Laserkoneistetun tiivisteiden testiajon tulokset ja viivasovitukset.



Kaavio 9. Vakiotiivisteiden testiajon tulokset ja viivasovitukset.

Lämpötilamittaukset otettiin tiivisteiden sekä pumpun rungosta, koska tiivisteiden rungon lämpötila ilmaisee sulkunesteen keskimääräistä lämpötilaa ja pumpun runko kammion sisällä olevan veden lämpöä. Kammioveden lämpö tulee suoraan testattavan tiivisteiden tuottamasta kitkalämmöstä. Kaavioista 8 ja 9 huomataan, että lämpötilan nousu noudattelee suurin piirtein logaritmista kertymää. Energiakulutukset noudattelevat sitä vastoin lineaarista suoraa. Tiivisteiden rungon alhaisempi lämpötila suhteessa pumpun runkoon selittyy sillä, että sulkuneste kiertää tiivisteestä pois jäähtymään, kun taas pumpun kammiovesi pysyy paikallaan lämmeten tehokkaammin. Sovitettujen viivojen kulmakertoimet ja korrelaatiot on nähtävissä taulukosta 20.

Taulukko 20. Testiajojen kulmakertoimet ja korrelaatiot.

<i>Kulmakerroin / korrelaatio (R^2)</i>	<i>Laserkoneistettu</i>	<i>Vakio</i>
<i>Pumpun runko</i>	5,92 / 0,964	5,61 / 0,950
<i>Tiivisteiden runko</i>	4,86 / 0,851	4,86 / 0,949
<i>Energiakulutus</i>	0,01 / 0,997	0,01 / 0,999

Korrelaatiot testidatan suhteen ovat hyviä, joskin laserkoneistetussa tapauksessa tiivisteiden rungon muita alhaisempi korrelaatio eli tulosten hajautuminen johtuu mittausvirheistä. Infrapunamittaus kiiltävältä pinnalta vaati harjoittelua ja se alkoi onnistua hyvin vakiotuotetta mitatessa. Pumpun rungon lämpötilan kulmakertoimissa on kuitenkin eroa, joten mittadatan eroavaisuutta tutkittiin lisäksi tilastollisessa Student t-testillä.

Testiä varten logaritminen mittadata linearisoitiin ja molempien testiajojen kulmakertoimet laskettiin regressiolaskennalla. Student t-testi suoritettiin näiden kahden kulmakertoimen välillä, jossa nollahypoteesina oletetaan, että kulmakertoimet ovat yhtä suuret. Tällaisessa tapauksessa t-arvo lasketaan seuraavalla yhtälöllä [47]:

$$t = \frac{b_1 - b_2}{\sqrt{s_{b_1}^2 + s_{b_2}^2}} \quad (24)$$

jossa t = Student t-testin vertailuun käytettävä laskennallinen arvo

b_1 = Regressiokulmakerroin pumpun rungon lämpötilalle laserkoneistetussa tiivisteessä

b_2 = Regressiokulmakerroin pumpun rungon lämpötilalle vakiotiivisteessä

s_{b_1} = Laserkoneistetun tiivisteiden kulmakertoimen otoskeskihajonta

s_{b_2} = Vakiotiivisteiden kulmakertoimen otoskeskihajonta

Mittadataista laskettiin seuraavanlaisesti t-arvo [47]:

		1.	2.
Otanta	n	29	36
Kulmakerroin	b	5,925	5,619
Otoskeskihajonta	s_b	0,219	0,220
t-arvo	t	0,986	

Vertailtava kriittinen t_0 -arvo määritettiin seuraavasti [47]:

Vapausasteet	df	61
Merkitsevyystaso	α	0,10
Kriittinen t-arvo	t_0	1,670

Laskelmista huomataan, että 0,1 merkitsevyystasolla kriittinen t_0 on suurempi kuin laskennallinen t-arvo eli $t_0 > t$. Näin alhaisella merkitsevyystasolla tämä tarkoittaa, että nollahypoteesia ei voi kumota eli tilastollisessa valossa pumpun rungon lämpötilakäyttäytymisiä ei voi todistaa erilaisiksi. Myös laskennallisen p-arvon korkeahko luku 0,328 viittaa nollahypoteesin voimaan jäämisen puolesta.

Edellä ilmoitettujen kulmakertoimien, niiden korrelaatioiden ja Student t-testin perusteella testattu laserkoneistettu tiiviste voidaan todeta vastaavan toiminnaltaan tuotannossa olevaa vakiotiivistettä.

5.5 KUSTANNUS- JA AIKA-ARVIOT

Todellisia tuotantokustannuksia on vaikea todentaa ennen varsinaisen tuotannon alkamista. Lisäksi uuden tuotteen valmistamisessa kuluja kertyy uuden opettelusta tai toiminnalle ei lasketa hintaa. Todellista hintaa on siksi vaikea laskea valmistetulle tiivisteelle. Tästä syystä on mielekästä verrata valmistuskuluja vakiotuotteeseen nähden samanlaisin arviointitavoin. Lämpöahdistussovituksen ja läppäyksen kustannuksia ei tarvitse huomioida, koska edellisen osion perusteella liukurenkaiden käsittely on tehtävissä laserkoneistetulle tiivisteelle samalla tavoin kuin vakiotuotteelle. Kustannusarvio kohdistetaan täten rakenneosien valmistamiseen raaka-aineesta lämpöahdistussovitetta edeltävään vaiheeseen.

Kun kustannusarviointi keskittyy rakenneosien valmistamiseen, kyseessä on laserkoneistuksen vertaamista lastuavaan koneistukseen. Kustannusarvioihin voidaan siis käyttää aikaisemmin esitettyjä RENI-laskelmia. Näiden laskelmien avulla voidaan myös selvittää tiivisteiden hintaa muille materiaaleille. Laserkoneistettujen osien viimeistelysorvauksen kustannukset määritetään samanlaisilla laskelmilla ja listään lopullisen tuotteen hintaan. Jotta laskelmat pysyvät yksinkertaisina, tuotettava erä koko on yksi kokonainen tiivistetuote eli yhteensä kuusi osaa. Lähtöarvot tiivisteiden valmistukselle on koottu taulukkoon 21.

Taulukko 21. Lähtöarvot kustannuslaskelmille.

	<i>Vakio</i>	<i>Laser</i>	<i>Viimeistely</i>
$V [cm^3]$	77,73	64,79	55,01
$V_{kok} [cm^3]$		68,647	
$h [mm]$		43,7	
$h_{kok} [mm]$		45,2	
a	0,831		0,151
$t_{asetus} [min]$	360	30	240

Taulukon 21 vakiotuotteen asetus aika (7h) perustuu haastattelun koneistajan arvioon, että tuotteen valmistamiseen kuluu kokonainen työpäivä. Laserkoneistuksen viimeistelysorvauksessa käytetään koetuotteen valmistuksessa kuluvaa aikaa (4h). Materiaali-, koneistus- ja asetuskustannuksissa sekä koneiden suoritusarvoissa eri materiaaleille käytetään luvussa 4.3 ilmoitettuja lukuaroja. Kuitenkin laserkoneistettujen osien viimeistelysorvauksessa käytetään lastuavan työstön viimeistelyarvoja ja materiaalikustannukset on sisällytetty laserkoneistuksen materiaalikustannuksiin.

Laskelmissa ei oteta kantaa osien irti leikkaamiseen paletista tai kuulapommituskustannuksiin. Osat on irrotettavissa tehokkaasti esimerkiksi sahalla tai kulmahiomakoneella ja laserkoneistetun tuotteen pinnan laatua voi parantaa myös muilla menetelmillä. Kustannuslaskelmat eri materiaaleille on nähtävissä taulukoista 22, 23 ja 24. Samoihin taulukoihin on laskettu myös valmistukseen kuluva aika.

Taulukoissa 22, 23 ja 24 olevat tuotteen hinnat P_{tuote} on laskettu kertomalla kokonaiskustannukset C_{kok} tuotteen tilavuudella ja materiaalin tiheydellä. Valmistusaika t_{kok} on laskettu kertomalla kokonaisominaismuodostumisaika G_{kok} tuotteen tilavuudella. Tuotteiden hinnoista nähdään, että kokeessa valmistetulla tavalla tehdyt tiivisteet olisivat vakiotiivistettä edullisempia vain nikkeliseoksissa. Laserkoneistuksen jälkeinen tuote itsessään on vakiota edullisempi jokaisella materiaalilla, mutta viimeistelykoneistus nostaa kustannuksia yli vakiotuotteen. Taulukon 25 kustannuskertymistä on nähtävissä tuotteen valmistuskustannuksiin vaikuttavien tekijöiden osuudet.

Taulukko 22. Laskelmat ruostumattomalle teräkselle eräkoolla yksi tuote.

<i>Ruostumaton</i>			
	Vakio	Laser	Viimeisteltä
$Q [cm^3/min]$	52,20	0,17	8,80
$G [min/cm^3]$	0,09	9,43	0,02
$G_{kok} [min/cm^3]$	4,73	9,89	4,38
$C_{mat} [€/kg]$	38,46	99,60	0,00
$C_{kone} [€/kg]$	12,14	371,96	2,62
$C_{tuote} [€/kg]$	50,60	471,56	2,62
$C_{asetus} [€/kg]$	428,03	35,81	405,76
$C_{kok} [€/kg]$	478,62	507,37	408,38
$P_{tuote} [€]$		259,69	177,47
	295,77		437,16
$t_{kok} [h]$		11,32	4,02
	6,12		15,34

Taulukko 23. Laskelmat nikkeliseokselle eräkoolla yksi tuote.

<i>Nikkeliseos</i>			
	Vakio	Laser	Viimeisteltä
$Q [cm^3/min]$	6,00	0,17	2,80
$G [min/cm^3]$	0,82	9,43	0,06
$G_{kok} [min/cm^3]$	5,45	9,89	4,43
$C_{mat} [€/kg]$	369,82	190,72	0,00
$C_{kone} [€/kg]$	127,77	349,82	9,95
$C_{tuote} [€/kg]$	497,59	540,54	9,95
$C_{asetus} [€/kg]$	403,18	33,68	381,60
$C_{kok} [€/kg]$	900,77	574,22	391,55
$P_{tuote} [€]$		312,51	180,93
	590,94		493,44
$t_{kok} [h]$		11,32	4,06
	7,06		15,38

Taulukko 24. Laskelmat titaaniseoksille eräkoolla yksi tuote.

<i>Titaaniseos</i>			
	Vakio	Laser	Viimeisteltä
$Q [cm^3/min]$	12,50	0,17	3,20
$G [min/cm^3]$	0,39	9,43	0,06
$G_{kok} [min/cm^3]$	5,02	9,89	4,42
$C_{mat} [€/kg]$	236,69	445,00	0,00
$C_{kone} [€/kg]$	115,03	666,33	16,58
$C_{tuote} [€/kg]$	351,71	1111,33	16,58
$C_{asetus} [€/kg]$	756,18	64,15	726,87
$C_{kok} [€/kg]$	1107,89	1175,48	743,44
$P_{tuote} [€]$		335,86	180,35
	387,52		516,22
$t_{kok} [h]$		11,32	4,05
	6,51		15,37

Taulukko 25. Kustannuskertymät eri materiaaleilla eräkoolla yksi tuote.

<i>Ruostumaton</i>			
	Vakio	Laser	Viimeisteltty
C_{mat} [€/kg]	8 %	20 %	0 %
C_{kone} [€/kg]	3 %	73 %	1 %
C_{asetus} [€/kg]	89 %	7 %	99 %

<i>Nikkeliseos</i>			
	Vakio	Laser	Viimeisteltty
C_{mat} [€/kg]	41 %	33 %	0 %
C_{kone} [€/kg]	14 %	61 %	3 %
C_{asetus} [€/kg]	45 %	6 %	97 %

<i>Titaaniseos</i>			
	Vakio	Laser	Viimeisteltty
C_{mat} [€/kg]	21 %	38 %	0 %
C_{kone} [€/kg]	10 %	57 %	2 %
C_{asetus} [€/kg]	68 %	5 %	98 %

Taulukon 25 kertymistä nähdään, että kustannuskertymät noudattelevat RENI-laskelmissa tehtyjä laskelmia. Lastuavalla työstöllä tehtävän vakiotuotteen suurin kustannus syntyy jokaisen materiaalin tapauksessa asetuksia tehdessä. Laserkoneistuksessa suurin menoerä on itse koneistus ja viimeistelykoneistuksen hinta koostuu käytännössä vain asetuskustannuksista. Mikäli tuotteen viimeistelysorvauksen asetuksen teko olisi nopeampaa tai asetuskustannukset itsessään edullisemmat halvemman koneajan muodossa, voisi lopullinen laserkoneistettu tuote olla edullisempi kuin vakiotuote. Lisäksi ylimääräisiä kustannuksia kertyy laserkoneistuksen aikana tehtävästä työstövarasta.

Vakiotuotteen huomattavasti pienemmät koneistuskulut tarkoittavat, että jos tuotetta tehtäisiin enemmän kuin yksi, tuotekohtainen hintaetu siirtyy vakiotuotteelle. Tämä johtuu siitä, että useamman tuotteen erässä asetuksista aiheutuvat kustannukset jakautuvat useamman tuotteen kesken. Laserkoneistuksessa tästä ei ole juurikaan hyötyä pienten asetuskustannusten takia. Tästä syystä laserkoneistuksen edut on nähtävissä tällä hetkellä juuri yhden tuotteen erätuotannossa.

Taulukoihin 22, 23 ja 24 lasketuista valmistusajoista t_{kok} nähdään, että kokonaisajaltaan laserkoneistettava tuote on hitaampi kuin lastuavalla työstöllä koneistettu. Toisaalta, laserkoneistusta voidaan tehdä miehittämättä eli osa työstä voidaan tehdä niin

sanotusti työajan ulkopuolella. Mikäli tilaus saapuisi työpäivän aikana, laserkone tuottaisi valmiin kappaleen yön aikana ja tuote olisi viimeistelykoneistettuna valmis jo seuraavan työpäivän puolivälissä. Tällä tavoin sovellettuna laserkoneistettu kappale valmistuisi vähintään yhtä nopeasti kuin lastuavalla työstöllä tehtävä kappale.

Jos tuotteen läpäisy aikaan lisätään vielä materiaalin hankintaan kuluva aika, on PBF-koneistuksen edut kasvavat. Erikoismateriaaleissa oikean kokoisen aihion saanti voi olla vaikeaa, eikä varastossa ole järkevää pitää suurta aihiovarastoa, jos tuotteen kysyntä kyseisellä materiaalilla on vähäistä. Pulverista on mahdollista tehdä monen kokoisia tuotteita ilman suurempaa materiaalihukkaa. Tällöin varastossa on järkevämpää säilyttää sopiva määrä pulveria kuin suurta aihiovarastoa tai etsiä markkinoilta sopivan kokoisia aihioita.

Kustannuslaskelmien perusteella laserkoneistetun tuotteen kilpailukyky vakioon nähden on tällä hetkellä lähes tasavertainen, kun valmistuserän koko on yksi tuote. Sama pätee myös valmistusaikaan.

6 YHTEENVETO

Tutkimuksen alussa perehdyttiin mekaanisen liukurengastiivisteiden materiaaleihin, teknologiaan sekä valmistustekniikoihin. Tiivisteiden ydin koostuu piikarbidiliukurengasparista, jonka oikeanlainen toiminta saavutetaan metallisten rakenneosien avulla. Kyseiset osat tehdään korroosiota kestävästä erikoismetallista lastuavalla työstöllä ja lisäävien menetelmien suurin potentiaali nähtiin näissä osissa joustavuuden lisääjänä.

Ainetta lisäävästä valmistuksesta esiteltiin aihealueen menetelmiä sekä toimintatapoja. Menetelmien tarkempi tarkastelu suuntautui pulveripetisulatusmenetelmiin (PBF), koska ne katsottiin soveliaimmiksi menetelmiksi rakenneosien valmistukselle. PBF-menetelmistä selvitettiin tämän hetkinen materiaaltarjonta, koneiden ominaisuuksia sekä tuotteen suunnitteluun liittyviä näkökulmia. Lisäksi menetelmän tuotantokustannuksia tutkittiin vertaamalla niitä lastuavan koneistuksen kustannuksiin. Tarkastelu tehtiin yhden tuotteen eräköölle ja PBF-menetelmät todettiin kustannusmielessä vertailukelpoisiksi lastuavan työstön kanssa, kun aihioista pitää poistaa materiaalia yli neljäviidesosa tuotteen aikaan saamiseksi.

Lisäävien menetelmien soveltuvuutta liukurengastiivisteelle testattiin käytännön kokein ja yhteistyökumppaniksi valikoitui laserjärjestelmiä toimittava yritys. Kyseisen tahon toimittamille materiaaleille tehtiin korroosiotestejä, jonka tuloksia verrattiin kirjallisuudesta löytyviin tietoihin. Valmistuskelpoisuutta testattiin valmistamalla yhdestä liukurengastiivisteestä laserkoneistettu versio, joka jatkokäsiteltiin vakiotuotteen tavoin lopulliseksi tiivisteeksi. Tuotteen geometriaa optimoitiin laserkoneistuksen ja jatkokäsittelyn kannalta niin paljon kuin oli mahdollista puuttumatta tuotteen toimintaperiaatteeseen. Valmistettua tuotetta testattiin koeponnistuksella sekä useamman päivän mittaisella koeajolla. Testien tuloksia verrattiin vakiotuotteella tehtyihin kokeisiin. Lisäksi valmistetun tuotteen tuotantokustannuksia vertailtiin vakiotuotteen tuotantokustannuksiin.

Kokeellisessa osiossa todettiin pulverimateriaalien korroosio-ominaisuuksien vastaavan samannimisen kaupallisen nimikkeen arvoja. Tehty tiiviste vastasi kokeiden perusteella valmistettavuudeltaan ja toimivuudeltaan vakiotiivistettä. Kustannuslaskelmien mukaan valmistettu tiiviste todettiin vakiotiivisteiden kustannuksiin nähden vertailukelpoiseksi. Näiden tietojen valossa lisäävillä menetelmillä on mahdollista valmistaa toimiva mekaaninen tiiviste.

7 POHDINTA

Tutkimukseen käytetyt lähteet ovat hyvin laajalta alueelta, joskin lisäävään valmistukseen viittaavat lähteet ovat pääosin kaupallisten toimijoiden materiaalia. Riippumattomien lähteiden vähäisyys johtuu teknologian nuoruudesta ja sen kehittämisestä yksityisten tahojen toimesta. Tämän takia tietoa on pyritty etsimään mahdollisimman monelta eri toimijalta.

Muiden menetelmien pois sulkeminen perustui kirjallisuudesta saatuihin tietoihin sekä vajaan tai kaukaisen palvelutarjonnan hankaluuksiin. Tämä ei siis tarkoita sitä, etteikö liukurengastiivisteitä ole mahdollista tehdä myös muilla metalleja käsittelevillä menetelmillä. Laserkoneistukseen päätyminen johtui osin halusta päästä nopeasti tutkimaan metallisten lisäävien menetelmien soveltuvuutta. Se osoittautui kuitenkin tehtyjen kokeiden perusteella oivalliseksi valinnaksi.

Teoriaosiossa esitetyt RENI-laskelmat on kehitetty tätä diplomityötä varten. Yhtälöt ja lausekkeet ovat laskennallisesti päteviä, joten tulosten paikkaansa pitävyydet pohjautuvat lähtöarvoihin. Laskelmien lähtöarvoista materiaalikustannukset on arvioitu melko karkeasti johtuen materiaalien suuresta kirjosta sekä vähäisestä julkisesta hintatiedosta. Materiaalien hinnat voivat muutoinkin heilahdella hyvin paljon tapauskohtaisesti. Koneistuskustannusten sekä asetusajojen lähtöarvot ovat melko tarkkoja, sillä koneajan ja asetusajan kustannukset koostuvat pääosin laitteen ostohinnan poistoista sekä työntekijän kustannuksista, jotka ovat yksiselitteisiä arvoja.

Viimeistelykoneistuksen kustannuslaskelmat on tehty 5-akseliselle työstökoneelle, mutta tuote olisi mahdollista viimeistellä jopa manuaalikonein, joten tämän työn kustannuksia voisi vielä vähentää. Toisaalta laserkoneistukselle optimoidut muodot herättävät kysymyksiä tiivisteiden toiminnalle todellisessa käyttöympäristössä. Esimerkiksi appelsiinipinta sekä pesäosassa olevat rivat saattavat aiheuttaa prosessiaineen kiinnittymistä aiheuttaen haittaa lämmön ja aineen siirtymiselle.

Lisäävän tuotannon seuraava tutkimusvaihe tiivisteissä olisi testiajojen teko oikeassa toiminnassa. Lisäksi menetelmien mahdollisuudet tiivisteiden toimivuuden parantamiseksi muotoja muokkaamalla olisi myös selvitettävä aihe. Tiivistetekniikan kannalta tärkeintä olisi kuitenkin se, että läheltä löytyisi luotettava alihankintaa tekevä konepaja, jonka konekantaan kuuluisi lastuavien koneiden lisäksi metallin käsittelyyn soveltuva AM-kone. Palvelun on oltava lähellä, jotta toimituksiin ei mene useaa päivää, ja johtuen tuotteen mitta- ja geometria vaatimuksista, viimeistelytyö hoituu samassa paikassa tehokkaasti lastuavin menetelmin.

8 LÄHDELUETTELO

- [1] A. M. Miettinen J., "Tiivistimet," tekijä: *Koneenosien suunnittelu*, Porvoo, WS Bookwell Oy, 2003, pp. 636-656.
- [2] J. Miettinen, Lisensiaatintyö: Mekaanisem Liukurengastiivisteiden käyttö ilman sulkunesteen kiertoa, Tampere: T:mi T. Martin & Co, 1993.
- [3] Tiivistetekniikka OY, "Tiivistetekniikan tuote-esittely," 2010. [Online]. Saatavilla: <http://www.tiivistetekniikka.fi/tuotteet/mekaaniset-tiivisteet/>. [Haettu 15 heinäkuu 2014].
- [4] Brittish Stainless Steel Association, "Article: Selection of stainless steels for handling sulphuric acid (H₂SO₄)," Llama Digital, 2014. [Online]. Saatavilla: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=33>. [Haettu 16 heinäkuu 2014].
- [5] European Committee For Standardization, *EN ISO 15156-3:2009*, Brussels: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2010.
- [6] Sandvik Materials Technology, "Sandvik SAF 2205," Sandvik AB, 30 huhtikuu 2014. [Online]. Saatavilla: <http://www.smt.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/sandvik-saf-2205/>. [Haettu 16 heinäkuu 2014].
- [7] British Stainless Steel Association, "Calculation of pitting resistance equivalent numbers (PREN)," Llama Digital, 2014. [Online]. Saatavilla: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=111>. [Haettu 16 heinäkuu 2014].
- [8] Tiivistetekniikka OY, "Tiivistetekniikan tuotesivut," 2010. [Online]. Saatavilla: <http://www.tiivistetekniikka.fi/L-Ohje/>. [Haettu 15 heinäkuu 2014].
- [9] N. B. Mayer E., *Mechanical Seals*, London: Iliffe Books Ltd, 1969.
- [10] I. Silvonen (omistaja) ja H. Myllärinen (tuotantopäällikkö), *Silmet Oy:n haastattelu*. [Haastattelu]. 16 toukokuu 2014.
- [11] T. Mahkonen (hallintojohtaja) ja V. Palovuori (tuotanto), *MetComp Oy:n haastattelu*. [Haastattelu]. 23 toukokuu 2014.
- [12] I. Gibson, D. W. Rosen ja B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, New York: Springer Science + Business Media, 2010.
- [13] ASTM International, "F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," ASTM International, Conshohocken, US, 2012.

- [14] EOS GmbH, "Aerospace: Advanced Manufacturing Process by EOS Optimizes Satellite Technology," EOS GmbH, [Online]. Saatavilla: <http://www.eos.info/cae8ad752dfaa394/aerospace-advanced-manufacturing-process-by-eos-optimizes-satellite-technology>. [Haettu 30 Heinäkuu 2014].
- [15] MakerBot® Industries, LLC, "MakerBot," MakerBot® Industries, LLC, [Online]. Saatavilla: <http://www.makerbot.com/>. [Haettu 30 Heinäkuu 2014].
- [16] i.materialise, "Meet the designer: Dizingof," i.materialise, 19 Joulukuu 2012. [Online]. Saatavilla: <http://i.materialise.com/blog/entry/meet-the-designer-dizingof>. [Haettu 1 Elokuuta 2014].
- [17] Arcam AB, "EBM® for Orthopedic Implants," Arcam AB, [Online]. Saatavilla: <http://www.arcam.com/solutions/orthopedic-implants/>. [Haettu 30 Heinäkuu 2014].
- [18] R. Leino, "Turbiinisiipiä tulostamalla," *Metallitekniikka*, nro 7-8, pp. 29-30, 2014.
- [19] MIT Technology Review, "GE and EADS to Print Parts for Airplanes," MIT Technology Review, 9 Toukokuu 2011. [Online]. Saatavilla: <http://www.technologyreview.com/news/423950/ge-and-eads-to-print-parts-for-airplanes/>. [Haettu 30 Heinäkuu 2014].
- [20] Optomec Inc., "LENS System," 2014. [Online]. Saatavilla: http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/LENS_850-R_datasheet.pdf. [Haettu 13 Elokuu 2014].
- [21] Roland Berger Strategy Consultants Holding GmbH, "RonaldBerger Studies: Additive Manufacturing," 29 Marraskuu 2013. [Online]. Saatavilla: http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Additive_Manufacturing_20131129.pdf. [Haettu 13 Elokuu 2014].
- [22] O. N. M. Shellabear, "DMLS - Development History And State Of The Art," tekijä: *LANE 2004 conference*, Erlangen, Germany, 2004.
- [23] O. Nyrhilä (johtaja) ja H. Heikkinen (tuotekehitysinsinööri) , *EOS Finland Oy:n haastattelu*. [Haastattelu]. 18 Kesäkuu 2014.
- [24] Arcam AB, "Arcam History," Arcam AB, [Online]. Saatavilla: <http://www.arcam.com/company/about-arcam/history/>. [Haettu 18 Elokuu 2014].
- [25] F. Thümmeler ja R. Oberacker, "Powder Production Techniques, Metal Powders," tekijä: *Introduction to Powder Metallurgy*, London, The Institute of Materials, 1993, pp. 6-48.
- [26] EOS GmbH / 3D Impuls Laboratory, "EOS DMLS - Materials for DMLS," 10 Syyskuu 2013. [Online]. Saatavilla:

- http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/eos_dmls-materials_for_dmls.pdf. [Haettu 26 Elokuu 2014].
- [27] Additively.com , "Laser Melting," swiss made software GmbH, [Online]. Saatavilla: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting>. [Haettu 27 Elokuu 2014].
- [28] EOS GmbH, "Material data sheet: EOS StainlessSteel 316L," EOS GmbH, München, 2014.
- [29] Outokumpu Stainless AB, "Standard Cr-Ni-Mo Stainless Steels," Outokumpu Stainless AB, Avesta Research Centre, Avesta.
- [30] H. Heikkinen (tuotekehitysinsinööri), *EOS Finland Oy:n haastattelu*. [Haastattelu]. 28 Toukokuu 2014.
- [31] EOS GmbH Electro Optical Systems, "EOS Systems and Equipment," EOS GmbH Electro Optical Systems, [Online]. Saatavilla: <http://www.eos.info/04ea46b9719f528e/systems-and-equipment>. [Haettu 19 Elokuu 2014].
- [32] EOS GmbH Electron Optical Systems, "Technical Description EOSINT M 280," EOS GmbH Electron Optical Systems, München, 2010.
- [33] Arcam AB, "Arcam Q10 Technical Data," Arcam AB, Mölndal, 2013.
- [34] Arcam AB, "Arcam A2 Technical Data," Arcam AB, Mölndal, 2013.
- [35] EOS GmbH / 3D Impuls Laboratory, "DMLS Design-Rules," 10 Syyskuu 2013. [Online]. Saatavilla: http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/dmls_design-rules_en.pdf. [Haettu 4 Syyskuu 2014].
- [36] Solid Concept Inc, "DLMA Design Guidelines," 2014. [Online]. Saatavilla: <https://www.solidconcepts.com/resources/design-guidelines/dmls-design-guidelines/>. [Haettu 4 Syyskuu 2014].
- [37] EOS GmbH / 3D Impuls Laboratory, "EOS Metal CS," 10 Syyskuu 2013. [Online]. Saatavilla: http://www.3dimpuls.com/sites/default/files/download/eos_metal_cs.pdf. [Haettu 4 Syyskuu 2014].
- [38] E. Bo, Interviewee, *Sähköpostikysely*. [Haastattelu]. 26 Kesäkuu 2014.
- [39] E. Niemi, "Noppa-portaali, Esko Niemi: Lastuava työstö," [Online]. Saatavilla: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/10048/materiaali/10048_esko_niemi__lastuava_tyosto.pdf. [Haettu 8 Syyskuu 2014].

- [40] S. Rengers, "Midwest SAMPE," 2012. [Online]. Saatavilla: <http://www.midwestsampe.org/content/files/events/dpmworkshop2012/Rengers%20EBM%20vs%20DMLS.pdf>. [Haettu 8 Syyskuu 2014].
- [41] Sandvik Coromant, "Kaavat ja määritelmät," Sandvik Coromant, [Online]. Saatavilla: http://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/technologies/silent-tools/formulas_and_definitions/pages/default.aspx. [Haettu 10 Syyskuuta 10].
- [42] Sandvik Coromant, "Download: catalogies, Supplement 13.2," 29 Heinäkuu 2013. [Online]. Saatavilla: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/c-2900-143.pdf>. [Haettu 11 Syyskuu 2014].
- [43] P. M. J.-Y. H. Olivier Kerbrat, "A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing," *Computers in Industry*, nro 62, pp. 684-692, 2011.
- [44] Outokumpu Oyj, Corrosion Handbook, Tenth Edition., Espoo: Outokumpu, 2009.
- [45] Haynes International, "Guide to Corrosion Resistant Nickel Alloys," 2001. [Online]. Saatavilla: <http://www.haynesintl.com/pdf/h2114.pdf>. [Haettu 2 Syyskuu 2014].
- [46] North American Stainless, "Long Products Stainless Steel Grade Sheet," 2010. [Online]. Saatavilla: <http://www.northamericanstainless.com/wp-content/uploads/2010/10/Grade-316-316L1.pdf>. [Haettu 15 Lokakuu 2014].
- [47] C. Zaiontz, "Real Statistics Using Excel: Comparing the slopes for two independent samples," WordPress, 2014. [Online]. Saatavilla: <http://www.real-statistics.com/regression/hypothesis-testing-significance-regression-line-slope/comparing-slopes-two-independent-samples/>. [Haettu 26 Syyskuu 2014].